UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UM FORMALISMO RELACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE ARRANJO FÍSICO INDUSTRIAL

Isaías Torres

Orientador: Prof. Dr. João Alberto Camarotto

São Carlos, SP, Brasil
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UM FORMALISMO RELACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE ARRANJO FÍSICO INDUSTRIAL

Isaías Torres

Orientador: Prof. Dr. João Alberto Camarotto

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção

São Carlos, SP, Brasil

2007

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar

T693fr

Torres, Isaías
Um formalismo relacional para o desenvolvimento de arranjo físico industrial / Isaías Torres. -- São Carlos : UFSCar, 2007.
205 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Arranjo físico industrial. 2. Simulação por computador. 3. Ergonomia. 4. CAD (Computer aided design). 5. Software. 6. Layout. I. Título.

CDD: 658.23 (20ª)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Rod. Washington Luís, Km. 235 - CEP. 13565-905 - São Carlos - SP - Brasil
Fone/Fax: (016) 3351-8236 / 3351-8237 / 3351-8238 (ramal: 232)
Email : ppgep@dep.ufscar.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Isaías Torres

TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA E APROVADA EM 28/02/2007 PELA COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. João Alberto Camarotto
Orientador - PPGEP/UFSCar

Prof. Dr. Miguel Antonio Bueno da Costa
Co-orientador - DEP/UFSCar

Prof. Dr. Milton Luiz Menegon
PPGEP/UFSCar

Prof. Dr. Orides Morandin Junior
DC/UFSCar

Prof. Dr. Antônio Batocchio
FEM/UNCAMP

Prof. Dr. Daniel Capaldo Amaral
EESC/USP

Prof. Dr. Alceu Gomes Alves Filho
Coordenador do PPGEP

À Minha Família

AGRADECIMENTOS

Reconhecer quem nos ajuda nos torna mais humanos e pessoas melhores. Gostaria de apresentar meus agradecimentos, não por contribuírem para esse trabalho, mas pela amizade e companheirismo, amor fraternal e compreensão durante esse período.

Muito obrigado, meus pais, irmãos e amigos. Obrigado aos mestres e amigos João Alberto Camarotto, Miguel Antônio Bueno da Costa e Nilton Luiz Menegon. Obrigado aos meus novos amigos de Sorocaba e ao pessoal do SimuCAD.

Este trabalho teve apoio parcial da CAPES.

RESUMO

O arranjo físico é um fator importante dos sistemas de produção e constitui-se em uma etapa do projeto de instalações produtivas onde convergem determinantes da estratégia de negócios, fatores econômicos e de trabalho, entre outros.

Os conhecimentos e técnicas dessa área de aplicação evoluíram na medida em que o próprio conceito de fábrica era alterado e novos aspectos passaram a ser considerados importantes. Tradicionalmente as ferramentas e técnicas desenvolvidas trataram geralmente de apenas um dos aspectos considerados no arranjo físico, como as relações de proximidade e de fluxo de materiais.

O trabalho desenvolvido buscou determinar um formalismo capaz de representar de forma integrada os aspectos considerados durante a criação e avaliação de alternativas de arranjo físico por grupos multidisciplinares de projeto. Esse formalismo, baseado em objetos e relações, rompe com a visão prescritiva do uso de programas computacionais usados em projetos de arranjo físico.

O programa computacional desenvolvido a partir do formalismo apresenta uma forma inovadora para projetar alternativas de layout, além de apontar várias outras oportunidades de inovação. Espera-se que o formalismo desenvolvido sirva de modelo para o desenvolvimento de outros programas computacionais desse tipo.

Palavras-chave: Arranjo físico, Simulação por computador, Ergonomia, CAD – Computer Aided Design, Software para Desenvolvimento de Layout

ABSTRACT

The facility layout planning is an important factor of production systems. It is an important step of the facility planning process where converge determinants from business strategy, economic and work factors, among others.

The knowledge and techniques of this application area have evolved as the factory concept itself have changed and new aspects were considered as important ones. The traditional tools and techniques have considered just part of the aspects related to the layout, as proximity relationships and material flows.

This work aimed to determine a formalism able to represent, in an integrated way, the aspects considered during the creation and evaluation of layout alternatives by multidisciplinary design teams. This formalism, based on objects and relationships, breaks with the prescriptive vision present in traditional facility layout software.

The software that has been developed from the formalism presents an innovative way for layout designing, and points out to several other innovation opportunities. It is expected that this formalism may be used for developing software to support work activities of people involved with industrial facilities planning.

Keywords: Layout, Computer Simulation, Ergonomics, CAD – Computer Aided Design, Facility Layout Software

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS ..... **IV**

RESUMO ..... **V**

ABSTRACT ..... **VI**

SUMÁRIO ..... **VII**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS ..... **XI**

LISTA DE FIGURAS ..... **XIII**

LISTA DE QUADROS ..... **XX**

1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 Objetivo 6

1.2 Justificativas 6

1.3 Estrutura do trabalho 11

2 REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS E ICÔNICAS USADAS EM ARRANJO FÍSICO **13**

2.1 Representações decorrentes das belas-artes 13

2.2 Representações decorrentes das técnicas de arranjo físico 18

2.3 Arranjo físico detalhado e sua representação 22

2.4 Representação das relações qualitativas de proximidade 30

2.5 Relações quantitativas: os fluxos entre as áreas de atividade 32

2.6 Representação dos processos e sua seqüência 36

2.7 Relações quantitativas temporais 39

2.7.1 Gráfico de Gantt e PERT 39

2.7.2 Mapeamento de fluxo de valor 40

2.8 Representações computacionais do arranjo físico 41

2.8.1 Representações gráficas de soluções analíticas 44

2.8.2 Pacotes computacionais para arranjo físico 46

2.8.3 Avaliação de arranjos físicos de postos de trabalho através da simulação humana 52

2.9 Interfaces baseadas em realidade virtual e potencial de uso para softwares de projetos de instalações industriais 56

2.9.1 Realidade aumentada e projeto de instalações 59

2.9.2 Interfaces naturais para manipulação de arranjos fisicos 60

2.10 A importância da escolha da representação para geração de arranjos físicos alternativos 63

3 MODELOS SIMBÓLICOS E AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE ARRANJO FÍSICO 67

3.1 Métodos de avaliação de desempenho de arranjo físico 67

3.2 Simulação 76

3.2.1 Definição e metodologia 76

3.2.2 Aplicação dos Modelos de Simulação 81

3.2.3 Uso de Simulação para avaliação de arranjos físicos 82

3.3 Fatores importantes para programas computacionais para o desenvolvimento de arranjo físico 93

3.3.1 Características gerais 93

3.3.2 A interface 95

3.3.3 Os objetos 95

3.3.4 As relações 97

3.3.5 As regras 101

3.3.6 As ajudas visuais e anotações 102

3.3.7 Características desejáveis de uma ferramenta para desenvolvimento de arranjo físico 102

3.4 Conclusões 103

4 O PROCESSO DO PROJETO DO ARRANJO FÍSICO E O PAPEL MEDIADOR DOS MODELOS 105

4.1 O processo de design 105

4.2 Participação nos projetos como forma de melhorar as soluções 107

4.3 Visões, domínios e restrições 109

4.4 Conflito e mediação através de artefatos 112

4.4.1 Modelagem de sistemas de produção 114

4.4.2 A ação do analista de sistemas produtivos sobre o modelo conceitual 121

4.4.3 Modelos como indutores de mudanças 122

4.5 A teoria geral dos sistemas revisitada 124

5 PROPOSIÇÃO DE UM FORMALISMO PARA MODELAGEM E ANÁLISE DE ARRANJO FÍSICO 127

5.1 Concepção do formalismo relacional 128

5.1.1 Modelo digital do arranjo real 129

5.1.2 Relacionamentos 130

5.1.3 Mundo-objeto 131

5.1.4 Visões 132

5.1.5 Consenso 132

5.2 Descrição de um formalismo para análise de arranjo físico 133

5.2.1 Mundos-objetos 134

5.2.2 Arranjos 138

5.3 Utilização do formalismo para o desenvolvimento de programas computacionais para o projeto de arranjo físico industrial 141

5.3.1 Etapas do desenvolvimento do protótipo 141

5.3.2 Implementação do protótipo 144

5.3.3 Criação de um módulo de fluxo de materiais 151
5.4 Exemplo de utilização do protótipo 156
5.4.1 Etapa 1: Criação dos objetos do arranjo fisico 157
5.4.2 Etapa 2: Análise do fluxo de materiais 162
5.4.3 Etapa 3: Trabalhando com relações qualitativas 166
5.4.4 Etapa 4: Trabalhando com regras 168
5.4.5 Conclusões do uso do modelo criado no protótipo 173
5.5 Teste do protótipo com interface convergente 174
5.6 Futuros desenvolvimentos do protótipo 177
5.6.1 Visão hierárquica e agregação 178
5.6.2 Implementação de algoritmos de otimização de arranjos fisicos 180
5.6.3 Implementação de manipuladores de padrão de fluxo 181
5.6.4 Utilização de manipuladores para a alteração dos dispositivos de manuseio. 183
5.6.5 Módulo para análise ergonômica 184
5.6.6 Relações multidimensionais: o conceito de campo de influência 184
5.6.7 Um editor visual de regras 186
5.6.8 Simulação de eventos discretos 186

6 CONCLUSÕES 188

7 REFERÊNCIAS 192

APÊNDICE A: Fórmulas usadas para cálculo dos fluxos no software FactoryFLOW

APÊNDICE B: Amostra de um arquivo XML usado para representar um objeto

APÊNDICE C: Arquivo da API OpenInventor que descreve uma molécula de água

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACD	*Activity Cycle Diagram*
ALDEP	*Automated Layout Design Program*
API	*Application Programming Interface*
ASME	*American Society of Mechanical Engineers*
CADD	*Computer Aided Drafting and Design*
CAM	*Computer Aided Manufacturing*
CAPP	*Computer Aided Process Planning*
CDP	Carta De-Para
CIM	*Computer Integrated Manufacturing*
CORELAP	*Computerized Relationship Layout Planning*
CRF	Carta de Relações Funcionais
CRP	Carta de Relações Preferenciais
DIN	*Deutsche Industrie Normen* ou Normas Industriais da Alemanha
DXF	*Data Exchange File*
DWG	*Drawing File* - Arquivo de desenho do AutoCAD
FFM	Fluxograma de Fabricação e Montagem
FMS	*Flexible Manufacturing System*
GPSS	*General Purpose Simulation System*
MFV	Mapa de Fluxo de Valor
NIOSH	*National Institute for Occupational Safety and Health* - EUA
OSHA	*Occupational Safety and Health Act*

PCP	Planejamento e Controle da Produção
PERT	*Program Evaluation and Review Technique*
POO	Programação Orientada a Objetos
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual
SED	Simulação de Eventos Discretos
SLP	*Systematic Layout Planning*
TGS	Teoria Geral dos Sistemas
UML	*Unified Modeling Language*
VRML	*Virtual Reality Modelling Language*
XML	*EXtended Markup Language*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Divisão do espaço em um modelo em terracota de uma cabana do período neolítico, cerca de 2000 a.C. (BENEVOLO, 2005) 1

Figura 1-2: Os desafios do projeto de arranjo físico 10

Figura 2-1: Fábrica de facas do século XIX em Sheffield, Inglaterra (DECCA, 1995, p. 33). 14

Figura 2-2: Processos primitivos de fabricação de açúcar (DECCA, 1995, p. 51) 15

Figura 2-3: Fábrica de geladeiras (APPLE, 1977, p. 116) 15

Figura 2-4: Desenho de um conjunto de evaporadores (MECKLENBURGH, 1973, p. 71) ... 16

Figura 2-5: Mecanismo de relógio descrito por Villard de Hannecourt, c.1250 (USHER, 1993, p. 260) 17

Figura 2-6: Torno de Besson para abrir roscas de parafusos, c. 1568 (USHER, 1993, p.470) 17

Figura 2-7: Arranjo físico de um moinho de cereais de 3 pavimentos, projetado em 1795 por Thomas Ellicott (MOORE, 1962, p. 5) 18

Figura 2-8: Arranjo dos grandes blocos de uma planta (VALLE, 1975, p. 60) 19

Figura 2-9: Arranjo físico de parte da produção de motores Diesel. Em destaque o percurso de uma das suas partes (VALLE, 1975, p. 61) 20

Figura 2-10: Arranjo físico de uma linha de transferência (VALLE, 1975, p. 62) 20

Figura 2-11: Relações de proximidade representadas sobre um balcão de atendimento de uma agência de correios (SimuCAD,2006). 21

Figura 2-12: (a) Montagem de representações do arranjo físico com gabaritos. (b) Conjunto magnético montado em uma maleta (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 646-647) 22

Figura 2-13: Gabaritos usados para montagem de arranjos (APPLE, 1977, p. 402)..... 23

Figura 2-14: Arranjo físico de uma linha de produção usando gabaritos comerciais (APPLE, 1977, p. 398) 23

Figura 2-15: Arranjo físico complexo montado com gabaritos bidimensionais (APPLE, 1977 , p. 397) 24

Figura 2-16: Adição manual de linhas de fluxo entre os equipamentos representados por gabaritos magnéticos (APPLE, 1977, p. 410). 25

Figura 2-17: Gabaritos tridimensionais (APPLE, 1977, p. 403). 25

Figura 2-18: Gabaritos-modelos de boa qualidade (PEMBERTON, 1977) 26

Figura 2-19: Gabaritos-modelos simplificados (PEMBERTON, 1977) 26

Figura 2-20: Gabaritos tridimensionais comerciais usados para representar os arranjos físicos (APPLE, 1977, p. 399). 27

Figura 2-21: A sofisticação dos gabaritos tridimensionais permitia a criação de verdadeiras maquetes do arranjo físico (PEMBERTON, 1977) 27

Figura 2-22: Modelo de um sistema de ar condicionado de dois andares (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 651) 28

Figura 2-23: Modelo de um AS/RS - sistema de armazenagem e recuperação automática (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 650) 28

Figura 2-24: Sistema de tratamento de refugos para uma planta de processamento de lã (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 651) 29

Figura 2-25: Gabarito que representa os equipamentos e as áreas necessárias para desenvolver as atividades do centro de produção (SimuCAD, 2006). 30

Figura 2-26: Carta de relações preferenciais. 31

Figura 2-27: Exemplo de um mapofluxograma simples (Adaptado de APPLE, 1977, p. 270). 32

Figura 2-28: Uso de fios de lã para representar os fluxos de materiais (APPLE, 1977, p. 135). 33

Figura 2-29: Carta-De-Para (CDP). 33

Figura 2-30: Carta de Relações Funcionais (WILDE, 1996). 34

Figura 2-31: Célula da CRF-Carta de Relações Funcionais (WILDE, 1996). 35

Figura 2-32: Diagrama de Relacionamento (MUTHER, 1976, p. 6-2) 35

Figura 2-33: Carta de processos (KONZ, 1985, p. 31) 37

Figura 2-34: Carta de Processos Múltipla (APPLE, 1977 , p. 134). 38

Figura 2-35: Fluxograma de Fabricação e Montagem (KONZ, 1977, p. 32) 38

Figura 2-36: Exemplo de gráfico de Gantt. 39

Figura 2-37: Exemplo de rede PERT. 39

Figura 2-38: Mapa de Fluxo de Valor (ROTHER & SHOOK, 1998). 40

Figura 2-39: Representação em CADD de uma unidade agroindustrial (SIMUCAD, 2006) . 42

Figura 2-40: Representação tridimensional em CADD de uma unidade agroindustrial (SIMUCAD, 2006) 43

Figura 2-41: Representação tridimensional renderizada da planta de uma fábrica de esquadrias metálicas (SIMUCAD, 2006) 44

Figura 2-42: Exemplo de arranjo físico gerado com o CORELAP. 44

Figura 2-43: Exemplo de arranjo gerado no BLOCPLAN (DONAGHEY, 1986), um programa para arranjo de blocos 45

Figura 2-44: Saída gráfica do programa LayOPT (GRAJO & BOZER, 1997). 45

Figura 2-45: Abordagem ascendente usada pelo sistema da DELMIA 48

Figura 2-46: Passo 1 para alteração de arranjo no Factory: abrir espaço no interior da edificação movendo as áreas WC9 e WC10 (Fonte: CIMTECHNOLOGIES, 1995, p. 36) 50

Figura 2-47: Passo 2 para alteração de arranjo no Factory: mover as área de atividade WC1 e WC7 (Fonte: CIMTECHNOLOGIES, 1995, p. 37) 50

Figura 2-48: Passo 3 para alteração de arranjo no Factory: recolocar as áreas de atividade WC9 e WC10 no interior da edificação (Fonte: CIMTECHNOLOGIES, 1995 , p. 38) 50

Figura 2-49: Relatório de fluxos gerado pelo software FactoryFLOW (CIMTECHNOLOGIES, 1995 , p. 22-23) 51

Figura 2-50: Exemplo de arranjo de uma fábrica de esquadrias metálicas manipulado no Factory (SimuCAD, 2006). 52

Figura 2-51: Simulador humano Jack pode modelar interações dimensionais complexas e analisar limites de alcance (TRANSOM, 2001). 53

Figura 2-52: Centro de produção modelado no simulador humano JACK (TRANSOM, 2001). 54

Figura 2-53: Exemplos de análises do ERGO: (a) Dimensionamento normatizado do posto de trabalho, (b) Análise de campo de visão e (c) Análise de alcance através de envelopes (DELMIA, 2006). 54

Figura 2-54: SANTOS, um simulador humano avançado (FARREL,2005, p. 61). 55

Figura 2-55: Espaços de trabalho são organizados como dispositivos espaciais de acesso a funções e informações (RESSLER, 1995). 57

Figura 2-56: Interfaces virtuais podem usar metáforas para acesso a informações (adaptado de RESSLER, 1995) 58

Figura 2-57: Modelo de um arranjo físico modelado em ambiente de realidade virtual (IQBAL & HASHMI, 2001, p. 404). 58

Figura 2-58: *Continuum* das aplicações de realidade virtual (Adaptado de BRAZ, 2005). 59

Figura 2-59: Acesso a informações disponibilizadas em ambiente de realidade virtual aumentada (BELL et al., 2001). 60

Figura 2-60: Interface com o usuário onde a percepção e a ação coincidem 61

Figura 2-61: Utilização do sistema BUILD-IT (FJELD et al. , 1999)..... 62

Figura 2-62: Tela de manipulação do arranjo do sistema BUILD-IT (FJELD et al. , 1999). . 62

Figura 2-63: Uma forma de representação que permita a alteração dos elementos constituintes é importante (MUTHER, 1977, p. 8-11) 64

Figura 2-64: Gabaritos tridimensionais para o projeto de arranjos de escritório (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 650). 64

Figura 3-1: Modelo de simulação feito no Automod (BROOKS, 2006.) 85

Figura 3-2: Representação gráfica típica do Promodel. 85

Figura 3-3: Representação gráfica do Arena. 86

Figura 3-4: Exemplo de ações que podem ser efetuadas no simulador Automod. 87

Figura 3-5: Exemplo da estipulação da lógica no software Arena 87

Figura 3-6: Exemplo de modelo construído usando o *software* de *Systems Dynamics* chamado Stella (ISEESYSTEMS, 2006) 88

Figura 3-7: Diagrama de ciclo-atividade para uma loja de troca de escapamentos de veículos. (Adaptado de PIDD, 1996). 89

Figura 5-2: Perspectivas de evolução dos softwares de simulação (Adaptado de DAVIS, 1998). 96

Figura 5-3: Porção de uma treliça dinâmica de Cattell. À direita estão as atitudes de um típico homem dos EUA, no meio os sentimentos e à direita os impulsos biológicos básicos (HALL et al., 2000, p. 267) 98

Figura 5-4: Representações usadas no arranjo físico e que são modelos do tipo entidade-relacionamento Um mapa mental explicando mapas mentais (MINDGRAPH, 2006). 98

Figura 5-5: Exemplo de um grafo direcionado (dígrafo). 99

Figura 5-6: Transformação da CRP em um grafo de relacionamento quantitativo. 100

Figura 4-1: Elementos de especificação do processo de design (Adaptado de PUGH, 1991)106

Figura 4-2: Conceitualização de técnica segundo DEJOURS (2003). 110

Figura 4-3: Gênese e difusão de modelos. Modificado de ZILBOVICIUS (1999). 116

Figura 5-1: *Concepção do formalismo relacional* 129

Figura 5-7: Exemplo de classes em UML. 134

Figura 5-8: O problema de arranjo físico envolve mundos-objetos que estabelecem entre si relações de corroboração e confrontação 135

Figura 5-9: As soluções de arranjo físico são criadas sob a ação de condicionantes. 137

Figura 5-10: Pode surgir no problema do arranjo físico um mundo-objeto consensual 138

Figura 5-11: Atributos são valores qualitativos ou quantitativos que podem estar sujeitos a restrições de valor 139

Figura 5-12: Caracterização de um Arranjo 140

Figura 5-13: Um relacionamento pode modelar várias ferramentas de arranjo físico. 140

Figura 5-14: Proposta de interface criada durante a fase de concepção da interface. (a) Implementação do modelo de relacionamentos como um grafo através de ícones; (b) Modelo digital tridimensional dos elementos concretos do chão-de-fábrica; (c) Hierarquia 142

Figura 5-15: Geração de programas a partir da especificação da classe em UML. 143

Figura 5-16: Vista geral do protótipo implementado computacionalmente. 145

Figura 5-17: Vistas usadas para implementar: (a) o acesso à biblioteca de objetos e (b) a edição de seus atributos. 146

Figura 5-18: Implementação da edição de relacionamentos entre os objetos. 147

Figura 5-19: Vista do modelo tridimensional do arranjo físico 148

Figura 5-20: Representação de uma molécula de água como um grafo de cena na OpenInventor. 149

Figura 5-21: Interface com o sistema especialista 151

Figura 5-22: Esquema da agregação de vértices e arcos em um grafo direcionado. 152

Figura 5-23: Exemplo de associação de atributos criados pelo usuário e os valores usados no cálculo de materiais. 154

Figura 5-24: Exibição dos fluxos depois de efetuados os cálculos da classe CFluxoDeMaterial. 154

Figura 5-25: A possibilidade de uso de expressões probabilística permitiu o desenvolvimento de um simulador de Monte-Carlo. 156

Figura 5-26: Introdução de um produto 158

Figura 5-27: Colocação dos objetos do processo do produto 1 159

Figura 5-28: Disposição dos objetos no arranjo fisico 159

Figura 5-29: Os objetos do arranjo sob estudo 160

Figura 5-30: Arranjo inicial dos objetos 160

Figura 5-31: Quatro funcionários operam o processo e a empilhadeira transporta os pallets 161

Figura 5-32: Relacionamentos de fluxo para o exemplo. 162

Figura 5-33: Inclusão de atributos nas relações de fluxo da freqüência e custo 163

Figura 5-34: Exemplo de relatório gerado pela análise de fluxo de materiais 165

Figura 5-35: Linhas de fluxo exibindo a intensidade de fluxos 165

Figura 5-36: Arranjo alterado. 166

Figura 5-37: Carta de relações preferenciais para o exemplo 167

Figura 5-38: Atributos associados a uma relação qualitativa de proximidade 167

Figura 5-39: Vista dos relacionamentos qualitativos e quantitativos do exemplo. 168

Figura 5-40: Mecanismo de disparo de regras de produção 169

Figura 5-41: Uma regra de produção escrita em CLIPS. 169

Figura 5-42: Como listar objetos do SR. 169

Figura 5-43: Envio de mensagem de impressão para um dos objetos. 170

Figura 5-44: Criação de uma regra para determinar a presença de um equipamento 170

Figura 5-45: Executando a máquina de inferência. 171

Figura 5-46: Regra para verificar a distância máxima entre dois objetos 172

Figura 5-47: Regra para testar a necessidade de implantação de uma esteira transportadora 173

Figura 5-48: Protótipo pode ser usado em a) na análise lógica do arranjo ou na análise e b) geração da solução manual do arranjo. 174

Figura 5-49: Montagem do sistema 175

Figura 5-50: Seleção de um objeto no modelo 175

Figura 5-51: Alteração do arranjo: movendo a bancada do centro do arranjo para a direita arrastando-a com o dedo. 176

Figura 5-52: Exemplos de manipulação de objetos: a) movimentação no plano XY; b) movimentação no eixo XZ; c) Rotação ao longo do eixo Z. 176

Figura 5-53: Discussão de alterações do modelo realizadas no próprio modelo 177

Figura 5-54: Grandes blocos são objetos abstratos como quaisquer outros. 178

Figura 5-55:Componentes da área de *Montagem* são outras três áreas. 178

Figura 5-56: *Árvore hierárquica dos objetos* 179

Figura 5-57: Agregação dos atributos dos fluxos 179

Figura 5-58: Ajuste automático de áreas 180

Figura 5-59: Padrões de fluxo encontrados (abstraídos) dos arranjos 181

Figura 5-60: O arranjo inicial apresenta um fluxo de material irregular. 182

Figura 5-61: Arranjo depois de aplicado a função de linearização do fluxo 182

Figura 5-62: Arranjo físico depois de aplicado o padrão de fluxo em U 183

Figura 5-63: Um manipulador pode ser construído para transformar um relacionamento de fluxo de materiais em sistemas de manuseio de materiais. 184

Figura 5-64: Alguns tipos de campo: a) linear, b) exponencial negativo e c) senoidal 185

Figura 5-65: Interferência entre campos de influência. 186

Figura 5-66: Implantação de uma classe para execução de simulação de processos discretos. 187

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Projetos desenvolvidos em vários tipos de indústria pelo grupo SimuCAD.....8

QUADRO 2: Módulos componentes do Layout Planner. 47

QUADRO 3: Métodos exatos e heurísticas baseadas em relações de adjacência (continua)..70

QUADRO 4: Procedimentos baseados em distância ou custos.....71

QUADRO 5: Procedimentos baseados em distância ou custos com *simulated annealing* e algoritmos genéticos. 72

QUADRO 6: Procedimentos que consideram o caminho dos fluxos.....73

QUADRO 7: Outros procedimentos (continua). 73

QUADRO 8: Métodos presentes em programas computacionais de arranjo físico 74

QUADRO 9: Comparação das duas formas de uso conjunto das rotinas tradicionais de arranjo físico e Simulação (Adaptado de ALEISA & LIN , op. cit.) (continua). 83

QUADRO 10: Comparação entre os diferentes elementos representados no programa (não-exaustiva).....91

QUADRO 11: Lista de características desejáveis de um software integrado (TORRES,2001). 94

QUADRO 12: Representações usadas no arranjo físico e que são do tipo entidade-relacionamento.....99

QUADRO 13: Algumas das tarefas e as soluções apontadas durante a etapa de planejamento do protótipo.....141

QUADRO 13: Movimentadores usados no transporte de material pelo arranjo.....164

1 INTRODUÇÃO

Projetar uma instalação de produção talvez seja um dos mais desafiantes problemas enfrentados por engenheiros. O conjunto de fatores que devem ser considerados, o montante de capital financeiro e humano envolvidos e a necessidade de produzir uma solução que satisfaça as necessidades da empresa por vários anos exemplificam essa dificuldade. Apesar de difícil, ao longo do tempo essa atividade foi sendo gradativamente organizada e consolidada como uma área de interesse da engenharia.

Há muito tempo, a ocupação do espaço e a sua organização constituiu-se em um fator importante para o homem. À medida em que as sociedades se organizavam, os espaços ocupados por ela foram alterados de acordo com suas atividades. Determinava-se o que podia ser armazenado e como, o que podia ser feito no espaço e quem podia ocupá-lo, entre outras coisas. Essa segmentação do espaço e a sua destinação a fins específicos são patentes em vestígios de várias populações humanas, em vários locais diferentes, como o mostrado na ***Figura 1-1***.

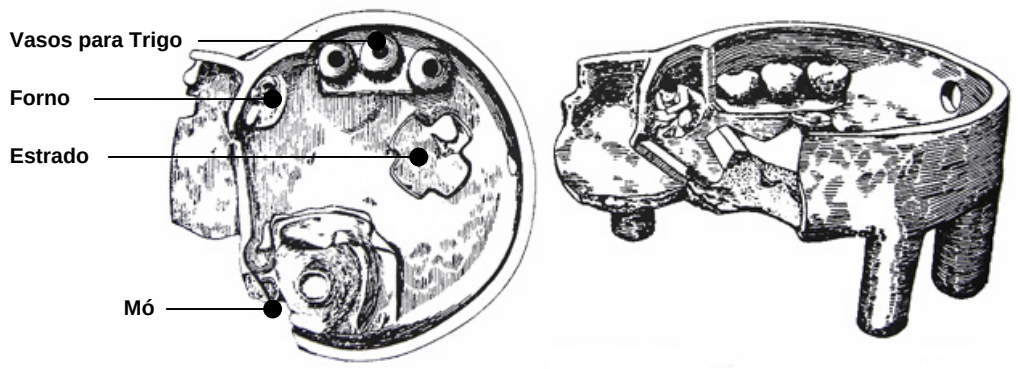


Figura 1-1: Divisão do espaço em um modelo em terracota de uma cabana do período neolítico, cerca de 2000 a.C. (BENEVOLO, 2005)

À medida em que a população aumentava, maior a necessidade de determinados itens, de espaço e de produção. A necessidade de maior desempenho dessas instalações não se refletiram somente em seu tamanho, mas também nas formas em que eram organizadas. A própria impossibilidade de realizar todas as atividades em um mesmo lugar e tempo pode explicar, pelo menos parcialmente, a segmentação e a especialização do espaço doméstico e urbano.

Após o advento da Revolução Industrial no século XVIII, parte dos esforços produtivos demandados pela sociedade são transferidos para instalações especializadas ou semi-especializadas na produção de determinados bens. A intensificação da atividade produtiva nas fábricas demandou um grau maior de organização. A divisão do trabalho e o desenvolvimento acelerado de novas tecnologias aumentaram a complexidade do espaço produtivo. Planejar a ocupação do espaço, a disposição dos materiais, das pessoas e dos equipamentos passou a ter uma maior importância para os indivíduos relacionados com essas instalações, seja como planejadores ou usuários. Nessa época, por exemplo, Eli Whitney, o "pai da padronização", teve que projetar as instalações para produzir mosquetes para o governo dos EUA após ter criado a tecnologia para implementar a sua idéia de peças intercambiáveis (MOORE, 1962, p.3-4). No século XX, com o advento da Administração Científica de Taylor, o arranjo físico produtivo e outras atividades como o estudo de movimentos e tempos e o controle da produção consolidaram-se como problemas de interesse e área de atuação dos engenheiros industriais. Muitas das técnicas de arranjo físico consolidaram-se juntamente com o fortalecimento do paradigma da produção em massa. Com o surgimento de outros paradigmas produtivos, também suas bases e técnicas foram questionadas e passaram a ser usadas de maneira diferente da original.

Mudanças que certamente influenciaram o projeto dos sistemas produtivos foram assinaladas por SIPPER & BULFIN JR (1998) e por HARREL & TUMAY (1995).

Esses autores afirmam que houve uma redefinição do escopo do negócio com a consideração dos fornecedores e dos consumidores como parte do processo, que passaram a interagir com o sistema de manufatura desde a sua fase de concepção. Houve também um aumento das necessidades de desempenho, principalmente motivado pelas demandas dos acionistas das empresas e do mercado financeiro. Os sistemas produtivos tiveram que se tornar mais flexíveis para fazer frente às inconstâncias dos mercados com relação a novos produtos e necessidades, o que demandou a adoção de técnicas de projeto diferentes, pois a maior parte dos custos de produção e da qualidade são definidos durante esta etapa. Exemplos dessas técnicas são o CADD (Desenho e Projeto Auxiliado por Computador), CAM (Manufatura Auxiliada por Computador), CAPP (Planejamento de Processos Auxiliado por Computador) e prototipagem rápida. Por outro lado, foram empregados esforços para reduzir parte da complexidade e variabilidade dos processos. Houve um aumento da simplicidade de todos os processos para permitir o seu entendimento por um maior número de pessoas e propiciar soluções simples, a eliminação da variabilidade dos processos produtivos através do uso da tecnologia, a redução de todas as perdas e de retrabalhos para permitir aumento de competitividade. O tempo de ciclo de vida dos produtos foi reduzido. Os sistemas de produção “puxados” ganharam importância assim como o fluxo de materiais e informações. Ocorreu a valorização do elemento humano como o recurso mais importante, com a legitimação do paradigma da melhoria contínua.

Essas mudanças têm impacto direto sobre a instalação industrial. CAMAROTTO (1998, p. 219-220) apresenta algumas mudanças ocorridas no desenvolvimento de edificações industriais que passou a considerar as mudanças nos modelos de gestão e do trabalho:

a) diminuição da segregação física de áreas;

b) consideração da flexibilidade da construção, sem necessidade de alteração da estrutura construtiva;

c) consideração das mudanças e tendências dos avanços tecnológicos da maquinaria;

d) padronização dos elementos construtivos e estruturais;

e) redução da necessidade de área em função da minituarização, automatização. Acrescente-se a isso a adoção de novos paradigmas produtivos, como a produção enxuta;

f) redução dos custos das instalações que passam a ser limpas, claras e de linhas ordenadas;

g) utilização de poucas colunas para garantir grandes vãos livres, boa iluminação e flexibilidade de colocação de mezaninos e níveis.

O arranjo físico ou *layout* é atualmente entendido como uma das etapas do projeto de instalações produtivas. Pode ser definido como “um plano, ou o ato de planejar, um arranjo ótimo de instalações industriais, incluindo pessoal, equipamentos operacionais, espaço de armazenagem, equipamentos de manuseio de materiais e outros serviços de apoio, paralelamente ao projeto da melhor estrutura para conter essas instalações” (MOORE, op. cit., p. 94) . Por “ótimo”, Moore refere-se a “planejar o melhor arranjo físico por qualquer critério que possa ser escolhido para avaliá-lo”.

Por sua forte dependência dos fatores condicionantes relativos a outros elementos do sistema produtivo, o arranjo físico assume um caráter eminentemente dinâmico. As mudanças do arranjo podem implicar em alterações de pequenas partes da planta, passando pela sua total reformulação, até a construção de uma nova. J. L. OLIVÉRIO (1985) lista uma série de mudanças nos fatores condicionantes que podem requerer a alteração do

arranjo físico: *mudança no projeto do produto ou inclusão de novos, melhoria das condições de trabalho e redução de acidentes, variações na demanda do produto, substituição de equipamento, mudanças no processo produtivo, mudança do mercado de consumo, introdução de novos métodos de organização e controle e redução de custos*.

Com a organização e estruturação do conhecimento a respeito da instalação industrial e à medida que o universo de fatores de sucesso da planta industrial aumentava, foram desenvolvidos técnicas e métodos para desenvolvimento de instalações industriais. Entre eles destacam-se os de IMMER (1950), REED Jr. (1961), MOORE (1962), NADLER (1965), APPLE (1977) e MUTHER (1978). A evolução dos métodos reflete a complexidade do escopo do problema de arranjo físico, que demandava novas formas de organizar os espaços procurando satisfazer os princípios e objetivos usados como critérios de desempenho de um arranjo adequado. J.M. TOMPKINS e J. M. WHITE (1984) resumem os métodos citados como possuindo o seguinte conjunto de passos:

1. definir os objetivos da instalação;
2. especificar as atividades primárias e de suporte para atingir os objetivos propostos;
3. determinar o interrelacionamento entre as atividades;
4. determinar a necessidade de espaço para as atividades;
5. gerar as alternativas de arranjo físico;
6. avaliar as alternativas geradas anteriormente;
7. selecionar uma das alternativas;
8. implementar a alternativa escolhida;
9. manter e adaptar o *arranjo físico* de acordo com as mudanças nos objetivos.

Esses métodos seguem os princípios estritos do chamado *design* de engenharia, caracterizado como um método seqüencial de refinamentos sucessivos, partindo-se de um

modelo macroscópico ao qual vão sendo adicionados mais detalhes. Com o questionamento dos sistemas produtivos tradicionais, também suas ferramentas de criação devem ser questionadas.

1.1 Objetivo

O objetivo central do trabalho é estabelecer um formalismo que oriente a construção de ferramentas computacionais interativas que permitam a criação e avaliação participativa de alternativas de arranjo físico.

Associados a esse objetivo estão os seguintes objetivos secundários:

a) determinar o estado da arte das representações usadas em arranjo físico;
b) implementar um protótipo computacional para testar a eficácia do formalismo.

As ferramentas computacionais desenvolvidas a partir do formalismo devem: (a) auxiliar no processo de geração de alternativas de arranjo físico; (b) documentar as restrições consideradas durante o projeto; (c) permitir a análise e comparação das alternativas geradas pelo grupo de projeto de arranjo físico industrial.

1.2 Justificativas

Apesar do impacto das mudanças nos processos organizacionais, grande parte das pesquisas sobre arranjo físico ainda tem seu foco na resolução de um problema sistemático, tal como formulado tradicionalmente, pois os pesquisadores em sua maioria têm seu foco de interesse em otimização. Do ponto de vista do ferramental utilizado, vários tipos de modelos foram desenvolvidos ao longo do tempo e foram aplicados ao problema. Apesar de alguns deles não terem sido desenvolvidos para esse fim, puderam apoiar as atividades de

desenvolvimento e análise de alternativas de arranjo físico. Os tipos de modelos mais empregados foram modelos icônicos e maquetes e os modelos matemáticos de otimização e simulação. Esses modelos tornaram-se mais complexos à medida que o conjunto de conhecimentos mobilizados para projetar uma instalação industrial tornou-se maior.

O advento dos computadores também contribuiu com a possibilidade de desenvolvimento de novos tipos de modelos e novas formas de manipulação das soluções até mesmo em tempo real e a longas distâncias. Apesar disso, as ferramentas computacionais para o desenvolvimento de arranjos físicos ainda apresentam características das antigas ferramentas, o que dificulta o aproveitamento das possibilidades oferecidas atualmente pela tecnologia computacional. Há necessidade de ferramentas computacionais que partam de uma estrutura organizada e que permitam o seu uso pelos participantes do grupo de projeto para compartilhar soluções geradas por eles e que reflitam os seus conhecimentos sobre as instalações que estão sendo projetadas.

Este trabalho rompe com paradigma do projeto seqüencial e estruturado de instalações industriais na medida em que é fruto da prática do autor em projetos de instalações industriais. Desde meados da década de 1990, como integrante do grupo SimuCAD da Universidade Federal de São Carlos, o autor participou de projetos de instalações fabris dos mais variados setores industriais (**QUADRO 1**).

Projeto	Descrição	Objetivos principais
I	Reprojeto de serraria industrial	Redução de casos de doenças do trabalho
II	Projeto de uma unidade fabril na Costa Rica para a produção de tabuinhas para lápis	Dimensionamento da unidade industrial considerando variabilidade da matéria prima e sazonalidade na disponibilidade de matéria prima
III	Reprojeto de unidade industrial para produção de lápis e outros materiais escolares	transferência de centro urbano para um distrito industrial
IV	Projeto e análise logística de uma planta processadora de chapas de aço para a indústria de eletrodomésticos	Projeto da planta considerando aumento significativo do volume de produção em etapas sucessivas de expansão
V	Projeto de planta contendo várias fábricas	Análise da logística interna a uma das fábricas e da movimentação dos modais rodo e ferroviário no interior da planta.
VI	Projeto de duas unidades para fabricação de esquadrias metálicas e de móveis de aço	Projetar uma nova fábrica para receber as duas fábricas existentes em uma nova área
VII	Análise de sistema de processamento de suco de laranja	Balanço de massa para considerar expansão de capacidade

QUADRO 1: Projetos desenvolvidos em vários tipos de indústria pelo grupo SimuCAD.

Nesses projetos, além de participar ativamente da geração de alternativas de arranjo físico, o papel desempenhado pelos integrantes do grupo de pesquisa foi fazer a mediação e apoiar a tomada de decisão utilizando os métodos e ferramentas computacionais disponíveis para projeto de instalações produtivas. Em todos esses projetos houve a participação de especialistas de várias áreas como vendas e *marketing*, manufatura, gerência industrial e gerência de logística. Além desses, também participaram consultores particulares, clientes das empresas e de operadores de máquinas, entre outros. Os profissionais envolvidos nos projetos possuíam graus diferentes de escolaridade e aportavam para os projetos informações dos mais variados graus de detalhamento. Os conhecimentos das áreas dos participantes variavam, por exemplo, de detalhes de operação de equipamentos a planos

estratégicos para horizontes de 10 anos. A quantidade de informações e interesses, muitas vezes conflitantes, exigiam o estabelecimento de um acordo entre os integrantes do grupo de projeto até mesmo com relação aos critérios para avaliação das alternativas. Em alguns casos decisões motivadas por questões alheias ao processo de manufatura foram tomadas com o projeto já em andamento e invalidaram boa parte do trabalho realizado até então. Dois exemplos disso foram: a) a troca da cidade de destino de uma planta que estava sendo projetada em função de um desacordo com a prefeitura que iria ceder a área da fábrica e b) a decisão de aumentar a capacidade de uma outra planta que estava sendo projetada de 500.000 ton/ano para 1.000.000 ton/ano.

A principal constatação dessa experiência foi a de que o modelo sistemático seqüencial preconizado pelos métodos tradicionais e implementado nas ferramentas computacionais não é totalmente adequado para apoiar as atividades de projeto de instalações industriais. As atividades de projetação requerem um alto grau de interação entre seus participantes. Essa visão explicita alguns dos desafios a serem enfrentados no processo de projeto de arranjo físico (***Figura 1-2***).

O processo de construção de alternativas de arranjo é um processo de decisão iterativo e interativo em que a verdadeira natureza e os detalhes do problema só são conhecidos à medida que o projeto é executado. Nesse processo, ilustrado na ***Figura 1-2***, as ferramentas, matérias-primas e demais recursos são mobilizados por iniciativa dos participantes do projeto para obter o objetivo principal que é o projeto das instalações. Historicamente, houve a transição de uma situação onde o projetista industrial era servido por uma série de informações fornecidas por outras áreas e passou-se a uma situação de trabalho em grupo. Nessa forma de trabalho, os portadores das informações são vistos como atores do processo de desenvolvimento do projeto e aportam conhecimentos e experiências específicas na forma de conceitos, habilidades, senso de valor e de estética entre outros. Esses atores são

oriundos de áreas como Engenharia de Processos, Ergonomia, Organização do Trabalho, Engenharia de Máquinas, Engenharia de Segurança, Engenharia de Materiais, Planejamento e Controle da Produção (PCP), entre outras.

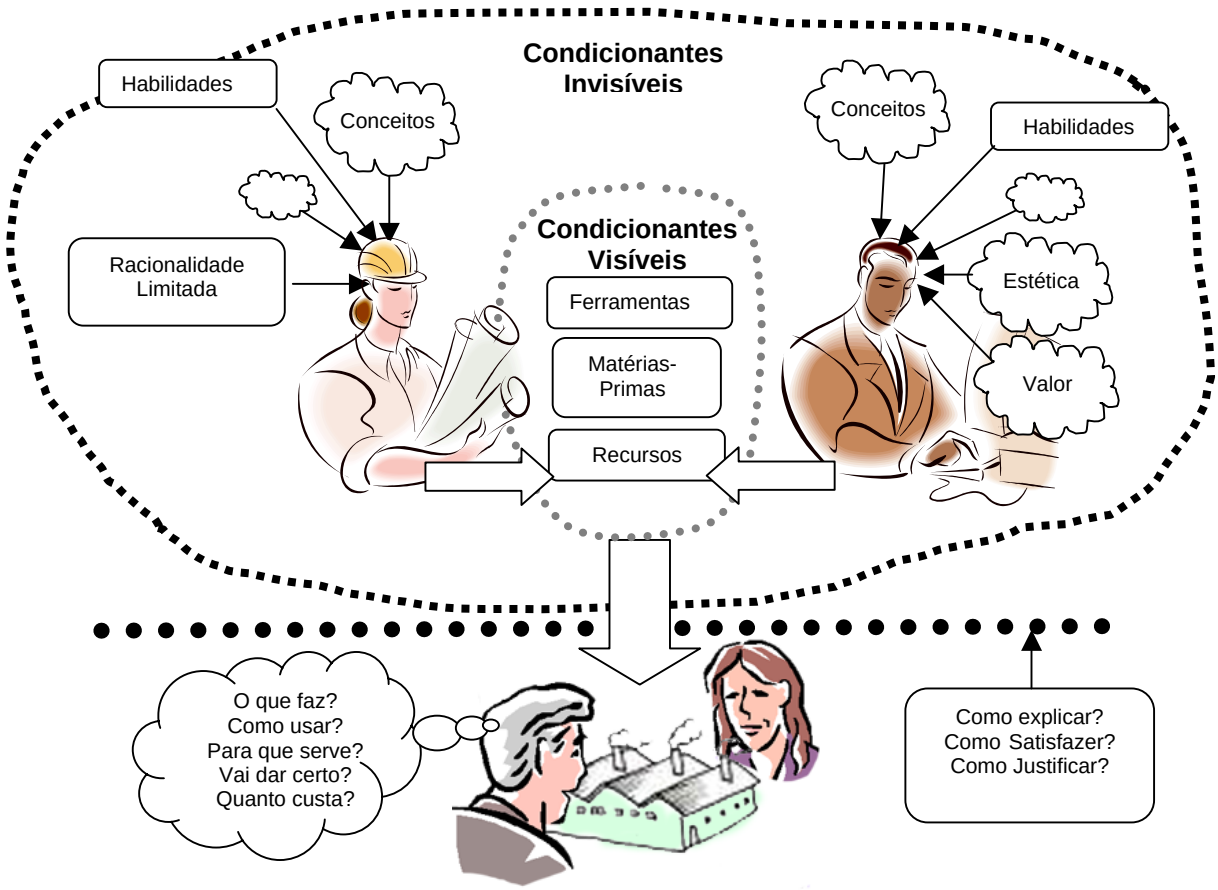


Figura 1-2: Os desafios do projeto de arranjo físico

Cada participante do processo traz consigo uma série de características e experiências subjetivas, crenças e valores que irão tomar parte do processo decisório de forma explícita ou implícita. Um dos desafios dos participantes é conciliar as contribuições oriundas desses diferentes pontos de vista para que, em tese, a solução alcance um desempenho equilibrado considerando vários critérios de desempenho. J. L. OLIVÉRIO (1985), SLACK et al. (1997), MUTHER (1978) e APPLE (1977) citam entre eles: aumentar o conforto, aumentar a segurança inerente de dispositivos e equipamentos, aumentar o moral e a

satisfação no trabalho, incrementar a produção, reduzir as demoras e o material em processo, economizar o espaço, reduzir o manuseio, melhorar a utilização do equipamento, mão-de-obra e serviços, reduzir o tempo de manufatura, reduzir os custos indiretos, melhorar a qualidade através de um reposicionamento dos equipamentos, facilitar o controle de custos e a coordenação gerencial, intensificar a utilização da força de trabalho, aumentar a flexibilidade para fazer frente às mudanças de demanda, nos produtos e nos equipamentos; facilitar o acesso para operação, limpeza e manutenção dos equipamentos, minimizar os investimentos em capital.

Um outro desafio do projeto é o de traduzir a solução para os usuários, decisores e outros que entrarão em contato com o resultado final do processo de projeto. A tarefa de projetar as instalações é um processo complexo que demanda uma quantidade e diversidade grande de dados. A solução, mesmo que simples, traz de forma subjacente um histórico de discussões realizadas ao longo do processo que não é facilmente compreendido por quem não participou dele. É preciso justificar as escolhas feitas, defender as soluções adotadas. É preciso ensinar a utilizar a solução, as suas capacidades, seus modos de uso, seus pontos fortes e fracos e quais são seus custos.

O entendimento de que o processo do projeto é multidisciplinar, desestruturado, iterativo e interativo, também é defendido por pesquisas sobre *designing* realizadas por pesquisadores como PUGH (1991), ARAÚJO (2006), SCHÖN (1988) e BUCCIARELLI (1988).

1.3 Estrutura do trabalho

Esta tese está estruturada em seis capítulos. No **Capítulo 1** é feita uma introdução ao problema do desenvolvimento de arranjo físico de instalações, descrito como um processo desestruturado, interativo e iterativo. No **Capítulo 2,** busca-se identificar as

formas de representação usadas para arranjo físico. Procura-se identificar quais elementos constituem uma representação, qual o meio físico usado para sua construção e a sua forma de uso. No **Capítulo 3**, a atenção é voltada para os modelos quantitativos. Busca-se identificar através de levantamento bibliográfico quais as formas de avaliação de soluções de arranjo físico, quais as representações quantitativas usadas e como esses modelos quantitativos são empregados no processo de geração e escolha de alternativas. No **Capítulo 4**, a partir do conhecimento dos artefatos usados como meios de representação e manipulação das soluções de arranjo, busca-se entender como se dá o uso de modelos icônicos e abstratos por grupos de indivíduos envolvidos em um processo de projeto (*design*). São destacadas as questões relativas à participação, à existência de diversas visões sobre o mesmo problema e o papel mediador de modelos no processo de projeto. No **Capítulo 5** é apresentado um formalismo relacional para o desenvolvimento de programas computacionais para modelar arranjos físicos. É apresentado um programa computacional desenvolvido para testar o uso do formalismo. Finalmente, no **Capítulo 6** são apresentadas as conclusões. Compõem ainda o documento, a lista de referências feitas ao longo do texto e anexos.

2 REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS E ICÔNICAS USADAS EM ARRANJO FÍSICO

Dada a complexidade dos condicionantes do arranjo físico, houve o desenvolvimento de várias formas de representação tanto dos arranjos físicos possíveis quanto de algumas das relações percebidas entre as áreas ou centros de produção. A importância assumida pelas representações é tal que, para MUTHER (1976, p. 10-1) , a representação inadequada pode dificultar a escolha entre as alternativas geradas. Historicamente, a necessidade dessas representações ocorre à medida que o arranjo físico passa a ser pensado como um conceito abstrato, em que há o abandono do posicionamento contigencial de recursos e equipamentos diretamente no chão-de-fábrica e se passa a considerar os posicionamentos relativos de todos os recursos, áreas e equipamentos entre si visando uma melhor utilização dos prédios e da área disponível.

2.1 Representações decorrentes das belas-artes

O chão-de-fábrica atraiu a atenção de várias pessoas, seja por curiosidade pelo fenômeno humano ou social, seja por razões técnicas como a divulgação de trabalhos e soluções, além é claro, a documentação. A observação das ***Figuras 2-1*** e ***2-2*** permite que se tenha uma visão da ocupação do espaço, das pessoas que conviviam nesse espaço e das ferramentas utilizadas. No entanto, não permite uma quantificação precisa da área ocupada ou a determinação da seqüência de produção, dois elementos importantes do estado-da-arte para a determinação do arranjo físico. O papel dessas representações, em alguns casos bastante

detalhadas, era restrito ao de mostrar a realidade como percebida pelo autor no momento de sua visita ao local.

Outra característica dessas representações das belas-artes é que manifestam muitas vezes uma intenção do artista em destacar algum aspecto que o impressionou ou através do qual pretende obter alguma reação de quem observa o produto da sua arte. Observando-se a ***Figura 2-1*** pode-se ver a complexidade da fábrica de facas, com seus objetos inusitados e a forte curvatura das costas do operário no seu esforço produtivo. Na ***Figura 2-2*** pode-se ver como as etapas da produção de açúcar estão encadeadas da esquerda para a direita, terminando novamente à esquerda, em cima. A idéia de intensidade é dada pela inclinação dos corpos dos operários. A idéia de esforço é dada pelo trabalho em duplas e pelos escravos que estão na moenda (à direita, em cima).

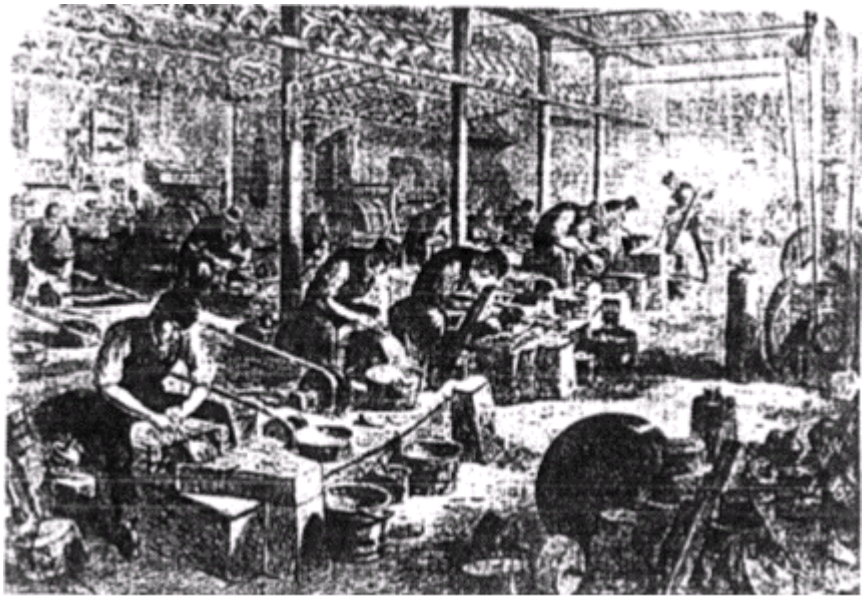


Figura 2-1: Fábrica de facas do século XIX em Sheffield, Inglaterra (DECCA, 1995, p. 33).

Figura 2-2: Processos primitivos de fabricação de açúcar (DECCA, 1995, p. 51)

As representações mais recentes também mantêm essa intencionalidade. Observando-se a ***Figura 2-3*** pode-se perceber o que está em destaque: o grande sistema de transporte automatizado da montagem de geladeiras. Na ***Figura 2-4***, são destacados os equipamentos que parecem brilhar mais do que os equipamentos reais que representam. O impacto visual fica ainda maior com a ausência de pessoas e demais detalhes.

Figura 2-3: Fábrica de geladeiras (APPLE, 1977, p. 116)

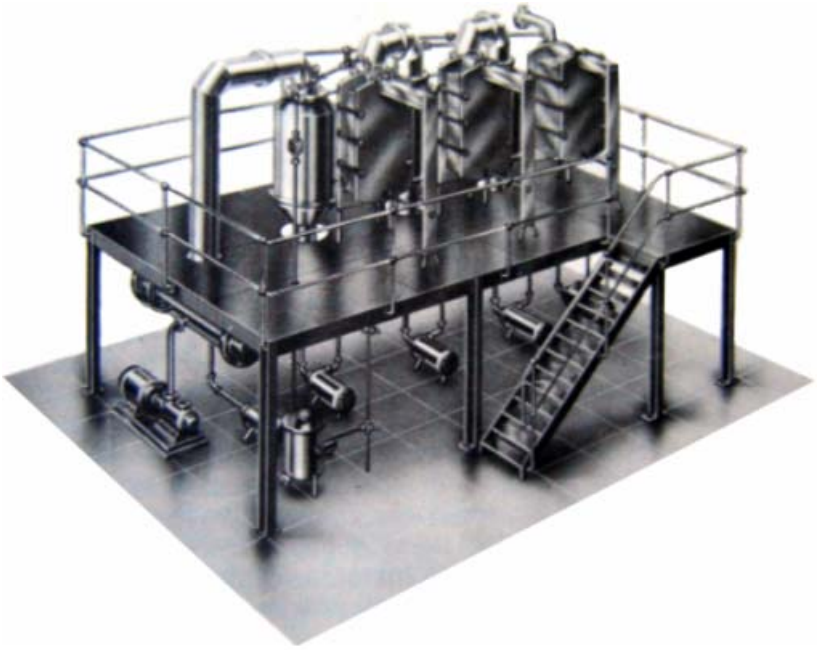


Figura 2-4: Desenho de um conjunto de evaporadores (MECKLENBURGH, 1973, p. 71)

À medida que novas tecnologias são desenvolvidas mais intensamente e começam a surgir pessoas que as pensavam, as representações também se alteram. Além da evolução das técnicas de representação do edifício industrial, a representação dos equipamentos, em um primeiro momento e depois dos demais elementos presentes no chão-de-fábrica também evoluem (***Figuras 2-5***, ***2-6*** e ***2-7***)

A precisão com que os objetos tinham que ser dispostos na fábrica também passou a ser representada, redundando em representações mais precisas e detalhadas. O tema do que deveria ser representado também se altera, de visões gerais da fábrica e equipamentos a representações detalhadas de seus componentes. É lícito pensar que tanto as tecnologias de transformação e manufatura quanto as de representação evoluíram agregando novos elementos aos existentes anteriormente, em um processo chamado por USHER (1993, p. 101) de síntese cumulativa. O aumento da precisão e do detalhamento dessas representações atingiu um grau que passou a permitir a construção de um novo equipamento e até uma nova fábrica a partir de uma representação e não a partir de uma outra fábrica existente. As

representações passam a demonstrar a preocupação com as regras, usos e costumes da atividade, à medida que passam a ser dirigidas à audiência mais restrita dos construtores fabris e de equipamentos (***Figura 2-7***).

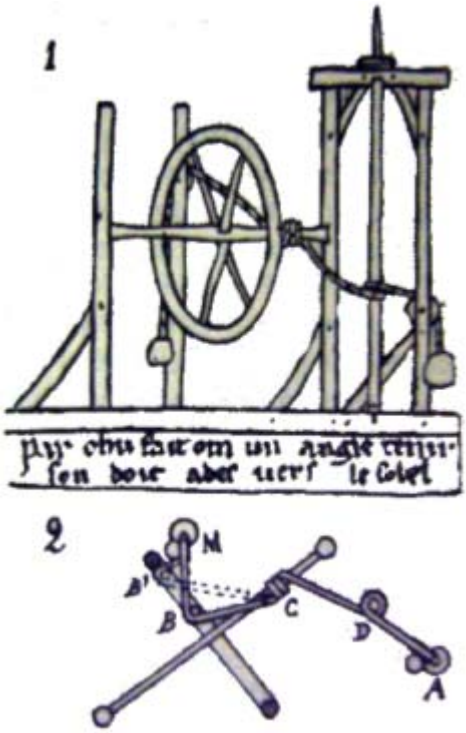


Figura 2-5: Mecanismo de relógio descrito por Villard de Hannecourt, c.1250 (USHER, 1993, p. 260)

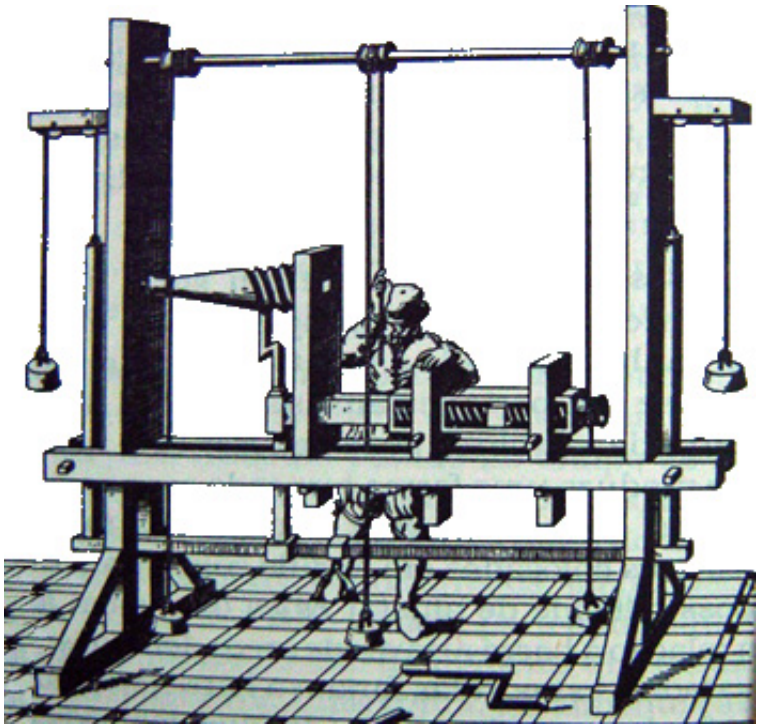


Figura 2-6: Torno de Besson para abrir roscas de parafusos, c. 1568 (USHER, 1993, p.470)

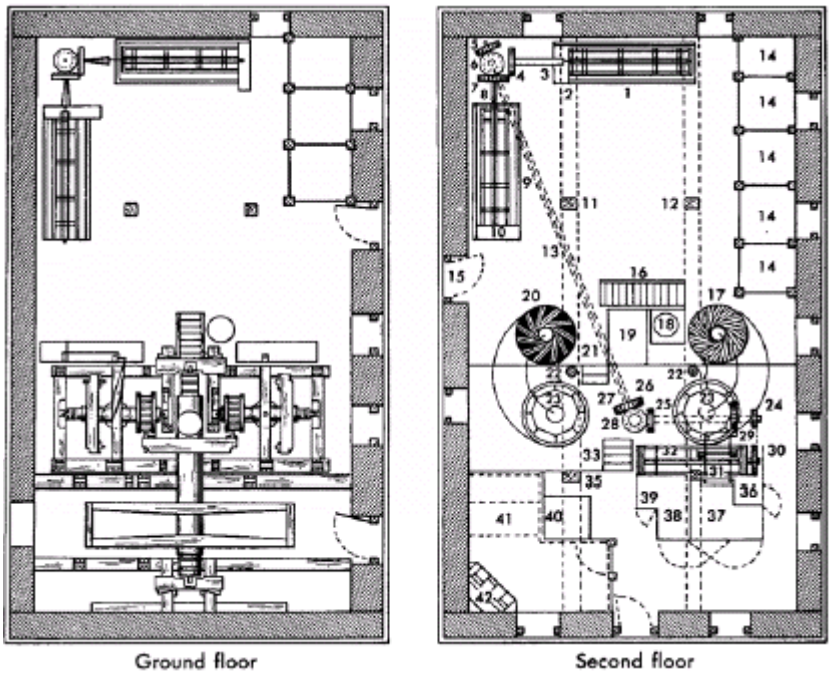


Figura 2-7: Arranjo físico de um moinho de cereais de 3 pavimentos, projetado em 1795 por Thomas Ellicott (MOORE, 1962, p. 5)

2.2 Representações decorrentes das técnicas de arranjo físico

As representações usadas no desenvolvimento de arranjo físico tiveram uma evolução bastante acentuada principalmente na primeira metade do século XX. Essas representações, utilizadas em um momento em que o conhecimento sobre os condicionantes do arranjo físico já tinha sido parcialmente construído e estruturado, não são apenas descritivas. Elas são portadoras de um viés analítico, uma vez que servem de suporte à análise das soluções de arranjo físico.

O uso dessas representações ocorre geralmente em três momentos distintos: (a) a percepção e o reconhecimento geral dos elementos que serão arranjados; (b) a alteração dos elementos visando uma solução satisfatória; (c) a avaliação da solução conseguida. Em função disso, o grau de abstração/detalhamento dessas representações varia em função da etapa em que são utilizadas. As representações criadas diferem não somente pelo tamanho das áreas

envolvidas, mas também pela natureza das relações que determinam o posicionamento dessas áreas entre si.

O grau de abstração/detalhamento reflete o processo de descobrimento e entendimento dos elementos do real a serem considerados na obtenção de soluções. As representações geralmente se iniciam com a visão geral das grandes áreas (***Figura 2-8***), prosseguindo para uma representação mais detalhada das máquinas e equipamentos (***Figura 2-9***), podendo atingir até o nível de detalhamento das áreas e espaços entre os postos de trabalho, como no caso de linhas de transferência (***Figura 2-10***).

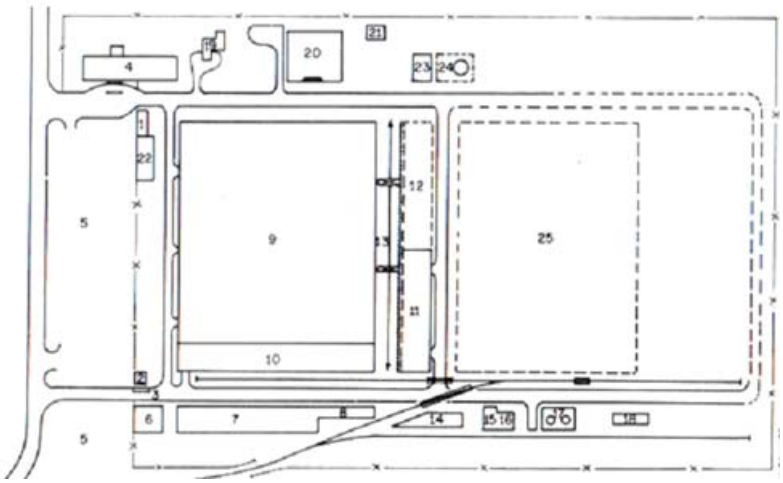


Figura 2-8: Arranjo dos grandes blocos de uma planta (VALLE, 1975, p. 60)

No nível do arranjo físico de massa (***Figura 2-8***), as grandes áreas da planta industrial são posicionadas para obter um maior aproveitamento do terreno e facilitar o transporte de materiais entre as áreas. Os fluxos não são necessariamente quantificados, mas estabelecem um encadeamento lógico entre as grandes áreas. Nesse nível são também consideradas as futuras áreas de expansão, o que pode determinar o posicionamento das áreas inicialmente presentes. Uma outra preocupação é o posicionamento das vias de acesso e de movimentação interna, assim como localização de grandes utilidades como as estações de tratamento de efluentes, depósitos de inflamáveis e também de estacionamentos e outras áreas de apoio.

No nível de abstração mostrado na ***Figura 2-9***, a preocupação geralmente é a utilização do espaço interno aos prédios. Considera-se a divisão do arranjo físico em áreas ocupadas por equipamentos, além das passagens entre as áreas. Observa-se que a representação dos fluxos é o principal fator orientador para posicionar os equipamentos relativamente entre si.

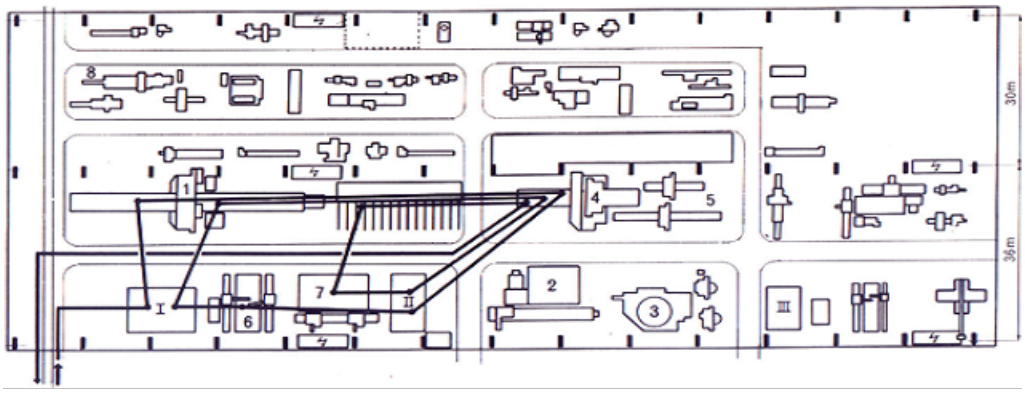


Figura 2-9: Arranjo físico de parte da produção de motores Diesel. Em destaque o percurso de uma das suas partes (VALLE, 1975, p. 61)

No nível de representação apresentado na ***Figura 2-10***, os blocos ou áreas a manusear são as áreas de departamentos (eventualmente de equipamentos) e sua disposição em células de fabricação, por exemplo. Nesse nível, os fluxos geralmente representados são os de materiais e têm uma quantificação mais precisa do que no nível superior. Em geral, também são representados os dispositivos de manuseio de materiais e as passagens e corredores.

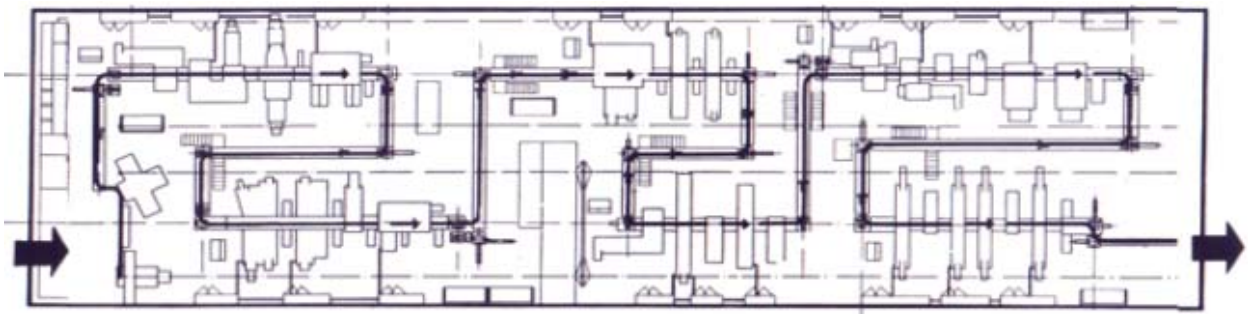


Figura 2-10: Arranjo físico de uma linha de transferência (VALLE, 1975, p. 62)

A disposição dos materiais e ferramentas em um posto de trabalho também pode seguir a mesma lógica da proximidade, priorizando os itens mais usados, buscando mantê-los ao alcance do trabalhador. Nesse nível de análise, a forma como o trabalho é realizado influencia bastante a configuração do posto, assim como a forma geométrica dos equipamentos e utensílios. Na ***Figura 2-11*** é utilizada a mesma codificação de cores sugerida por MUTHER (1976) para representar as relações de proximidade. As linhas vermelhas indicam que é absolutamente importante que o operador do posto esteja próximo do cliente, do computador e da impressora. As cores azul e amarela indicam, respectivamente, "pouco importante" e "importante".

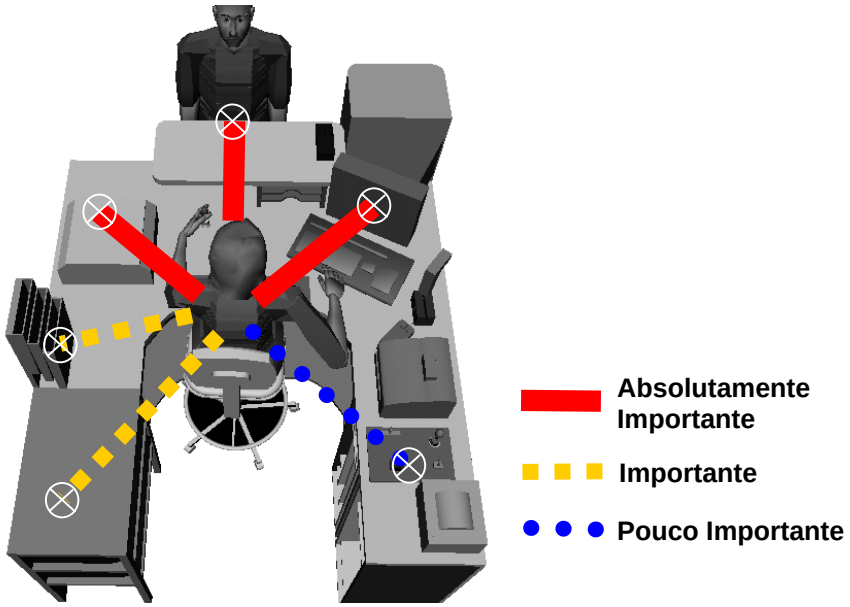


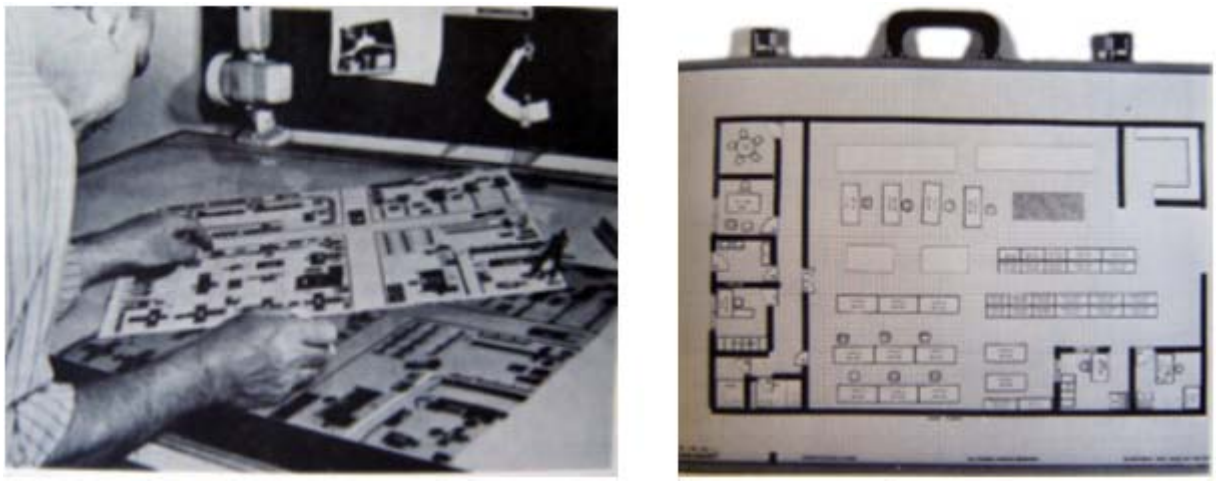
Figura 2-11: Relações de proximidade representadas sobre um balcão de atendimento de uma agência de correios (SimuCAD,2006).

Esses níveis de detalhamento refletem a lógica de detalhamentos sucessivos (também chamada de *top-down* ou descendente) preconizadas pelos métodos de desenvolvimento de arranjo físico. Nessa lógica começa-se pelo arranjo físico de grandes áreas que vão sendo detalhadas até o nível do posto do trabalho. Eventualmente alterações nos níveis mais baixos implicam em mudanças nos níveis superiores (menos detalhados) daí essa

lógica ser reconhecida como iterativa. O grau de iteratividade é elevado, o que exige que os modelos e cálculos sejam refeitos inúmeras vezes, caracterizando a dificuldade geralmente encontrada nos projetos de instalações industriais.

2.3 Arranjo físico detalhado e sua representação

Simplesmente representar os equipamentos e áreas não foi suficiente como apoio às atividades do analista de arranjo físico. Com o passar do tempo as representações evoluíram de forma a permitir modelos mais flexíveis que permitissem a alteração dos arranjos físicos para que soluções alternativas fossem avaliadas mais rapidamente. A utilização de representações chamadas de gabaritos (ou *templates*) mostraram-se convenientes, uma vez que permitiram a criação de verdadeiros jogos de montar ou quebra-cabeças (***Figura 2-12***). Os gabaritos de equipamentos como os da ***Figura 2-13*** eram feitos de materiais como plástico, metal e papelão e dispostos para formar arranjos físicos como o mostrado na ***Figura 2-14***.



(a) **(b)**

Figura 2-12: (a) Montagem de representações do arranjo físico com gabaritos. (b) Conjunto magnético montado em uma maleta (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 646-647)

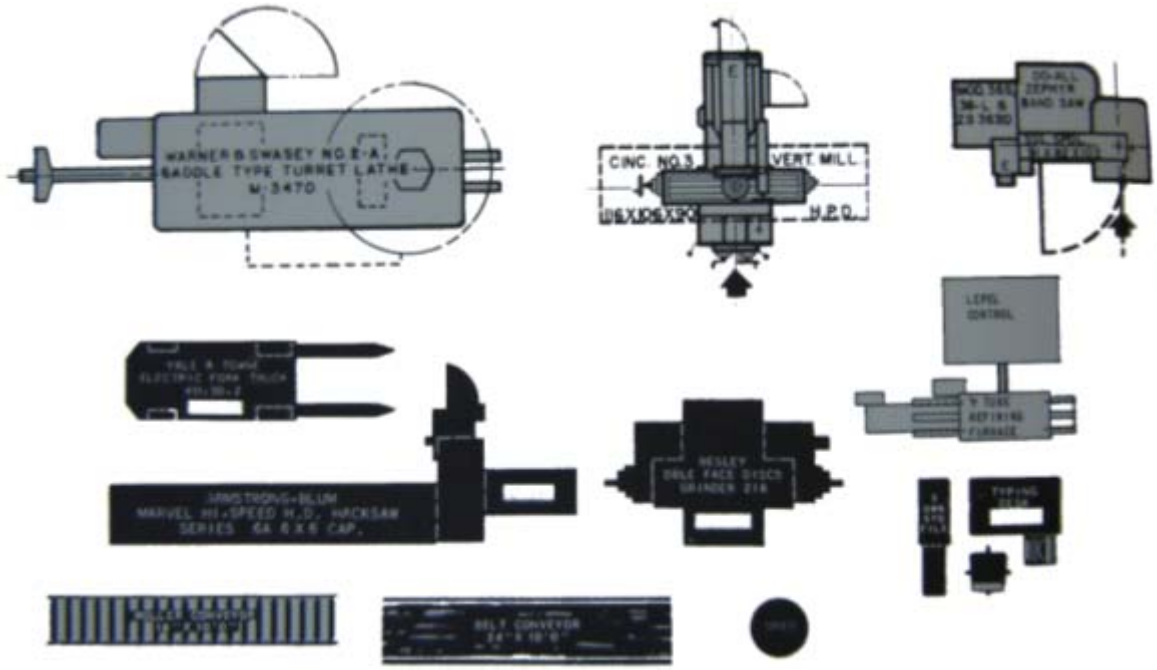


Figura 2-13: Gabaritos usados para montagem de arranjos (APPLE, 1977, p. 402)

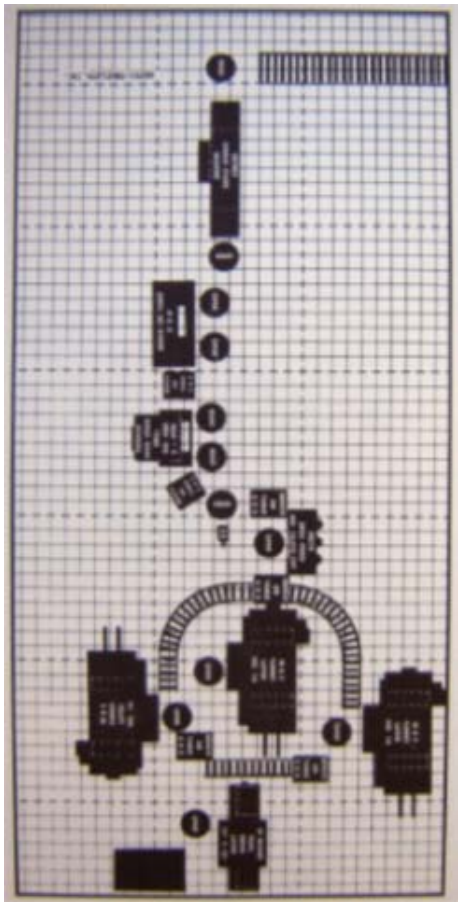


Figura 2-14: Arranjo físico de uma linha de produção usando gabaritos comerciais (APPLE, 1977, p. 398)

A ***Figura 2-14*** mostra um conjunto onde os gabaritos comerciais de papelão são colocados sobre uma base de papel quadriculado. O tamanho dos arranjos físicos que podem ser representados são relativamente grandes como mostrado na ***Figura 2-15***.

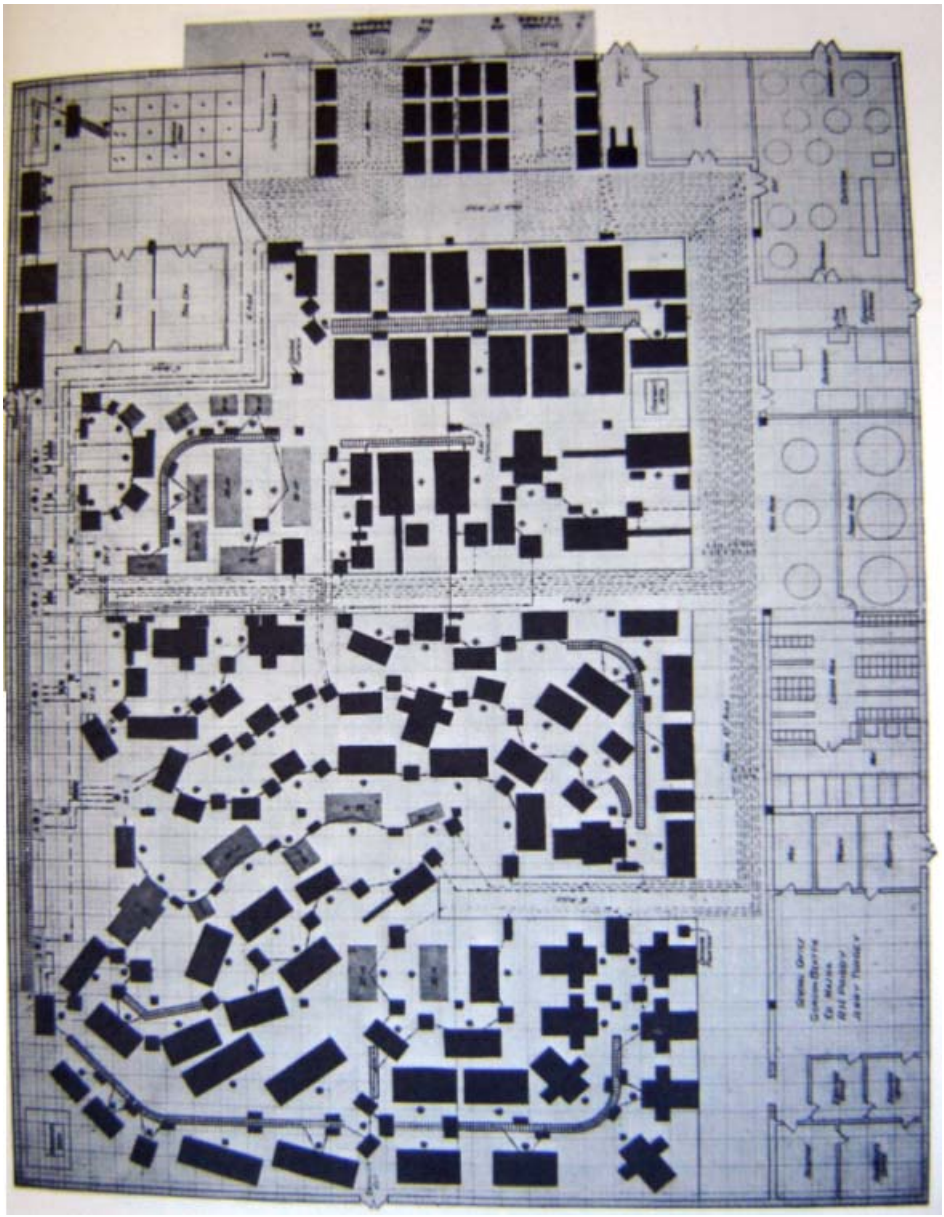


Figura 2-15: Arranjo físico complexo montado com gabaritos bidimensionais (APPLE, 1977 , p. 397)

Apesar da utilização dos gabaritos comerciais, com as escalas corretas dos equipamentos vendidos à época, os analistas ao montarem seus arranjos físicos acrescentavam elementos, como a planta do prédio e as linhas de fluxo entre os equipamentos, como

mostrado na ***Figura 2-15*** e na ***Figura 2-16***, respectivamente. Ao acrescentar esses detalhes adicionais, houve um aumento da capacidade de representação do meio usado para representar as alternativas de arranjo físico.

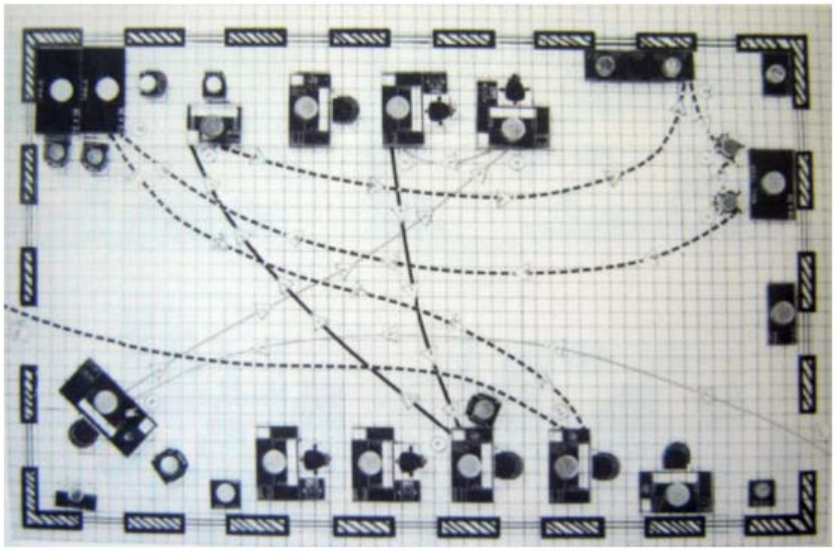


Figura 2-16: Adição manual de linhas de fluxo entre os equipamentos representados por gabaritos magnéticos (APPLE, 1977, p. 410).

A evolução natural dos gabaritos dos equipamentos foi a utilização dos modelos tridimensionais em escala (geralmente 1:50), como os mostrados na ***Figura 2-17***. Com isso, tornou-se possível uma melhor avaliação da utilização do espaço tridimensional e também uma melhor avaliação qualitativa da solução obtida.

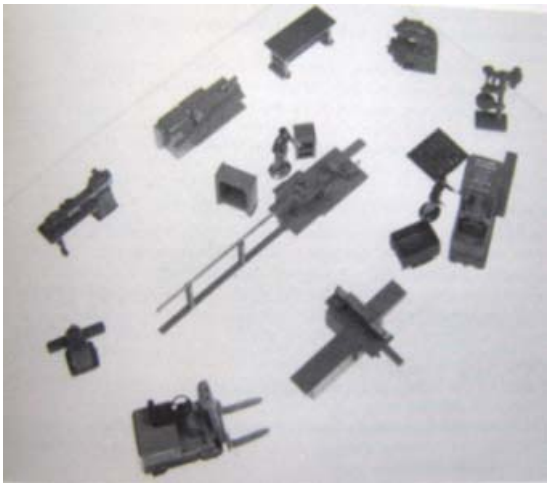


Figura 2-17: Gabaritos tridimensionais (APPLE, 1977, p. 403).

O fato de se utilizar gabaritos tridimensionais não garante uma representação mais apurada dos equipamentos do arranjo fisico. Os gabaritos usados podem ter uma qualidade razoável (***Figura 2-18***) ou não (***Figuras 2-19 e 2-20***). Além do preço ser um fator limitador do uso desses gabaritos, nem sempre é possível encontrar modelos para máquinas de uma determinada fábrica, daí a necessidade freqüente de improvisar soluções domésticas feitas de materiais fáceis de encontrar e sem um bom acabamento dimensional ou superficial. Além disso, a utilização de gabaritos não é uma unanimidade entre os autores de livros sobre arranjo físico. Para KONZ (1985), por exemplo, o uso dessas representações é destinado a secretárias e pessoal de vendas. Essa opinião reflete a idéia de que as representações usadas pelos desenvolvedores dos arranjos físicos são inteligíveis apenas por eles e não são adequadas para usuários não especializados em arranjo físico.

Figura 2-18: Gabaritos-modelos de boa qualidade (PEMBERTON, 1977)

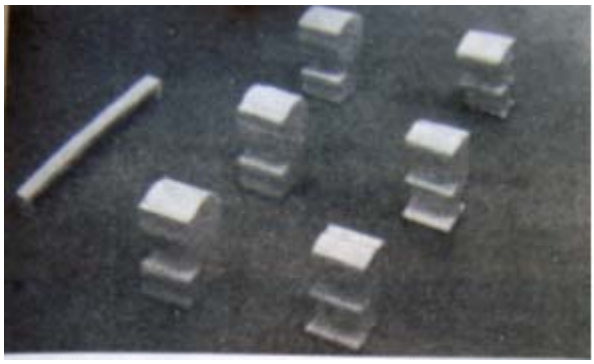


Figura 2-19: Gabaritos-modelos simplificados (PEMBERTON, 1977)

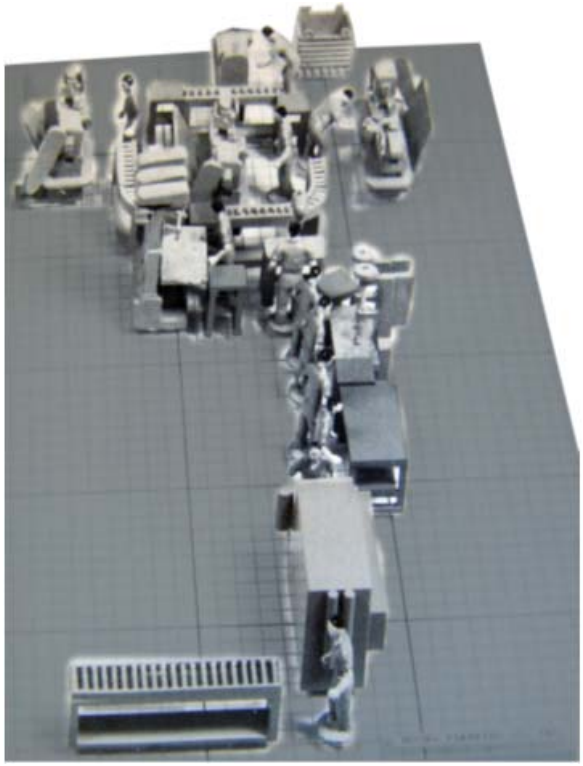


Figura 2-20: Gabaritos tridimensionais comerciais usados para representar os arranjos físicos (APPLE, 1977, p. 399).

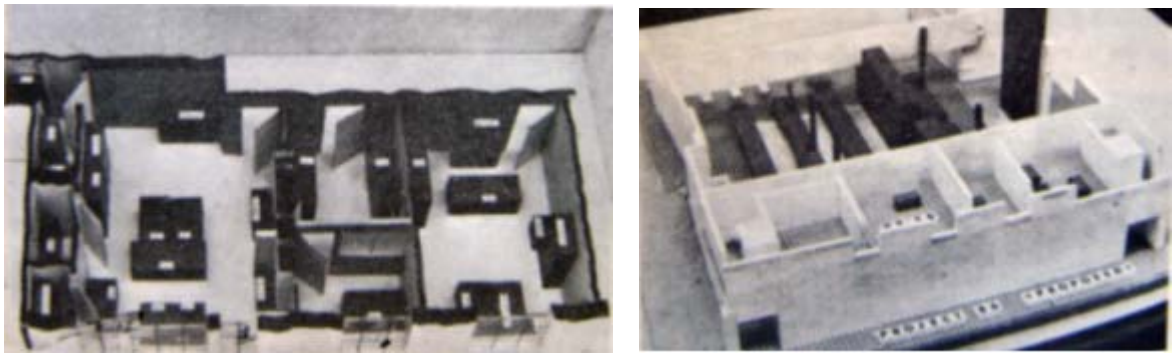


Figura 2-21: A sofisticação dos gabaritos tridimensionais permitia a criação de verdadeiras maquetes do arranjo físico (PEMBERTON, 1977)

Dada a complexidade dos modelos, em alguns deles é praticamente impossível identificar os gabaritos que são facilmente vistos como verdadeiras obras de maquetaria, como mostram as ***Figuras 2-21, 2-22***, ***2-23*** e ***2-24***.

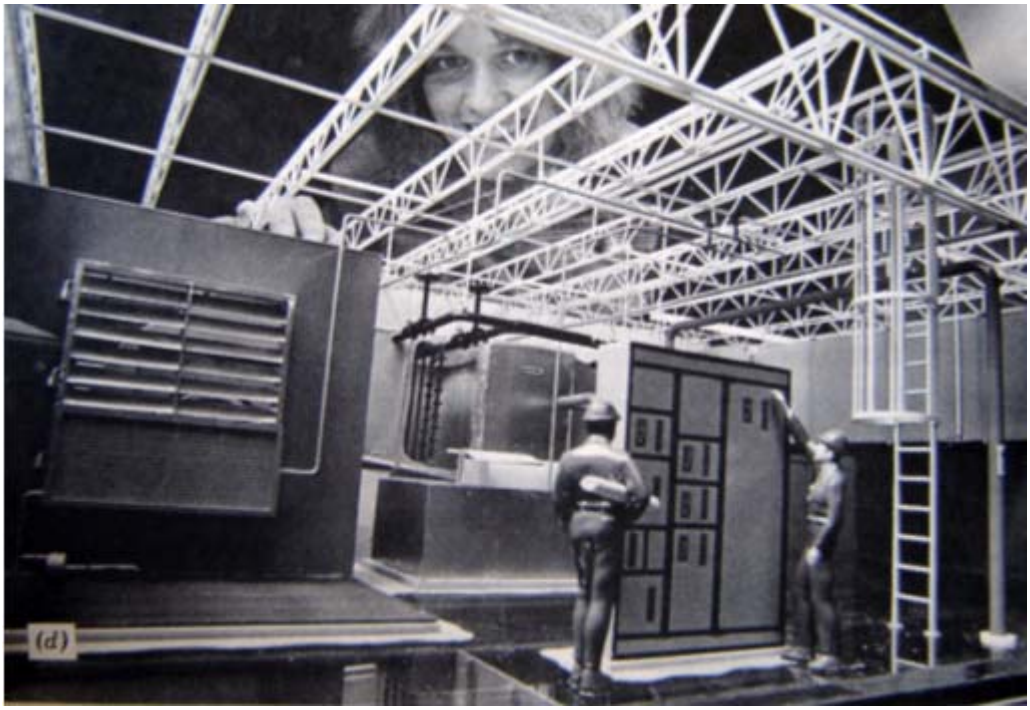


Figura 2-22: Modelo de um sistema de ar condicionado de dois andares (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 651)

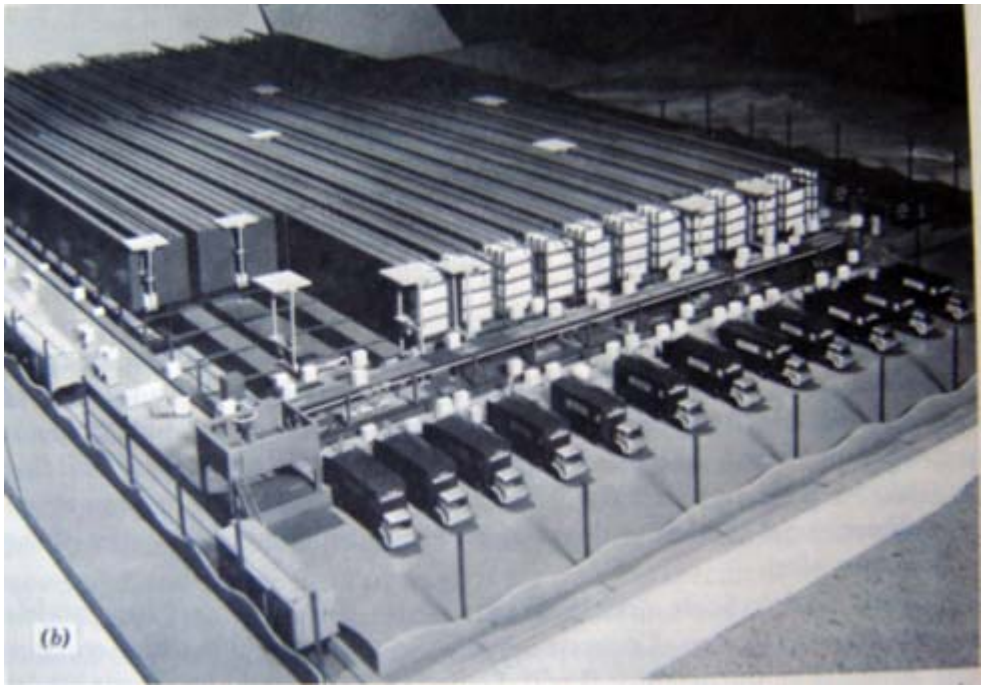


Figura 2-23: Modelo de um AS/RS - sistema de armazenagem e recuperação automática (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 650)

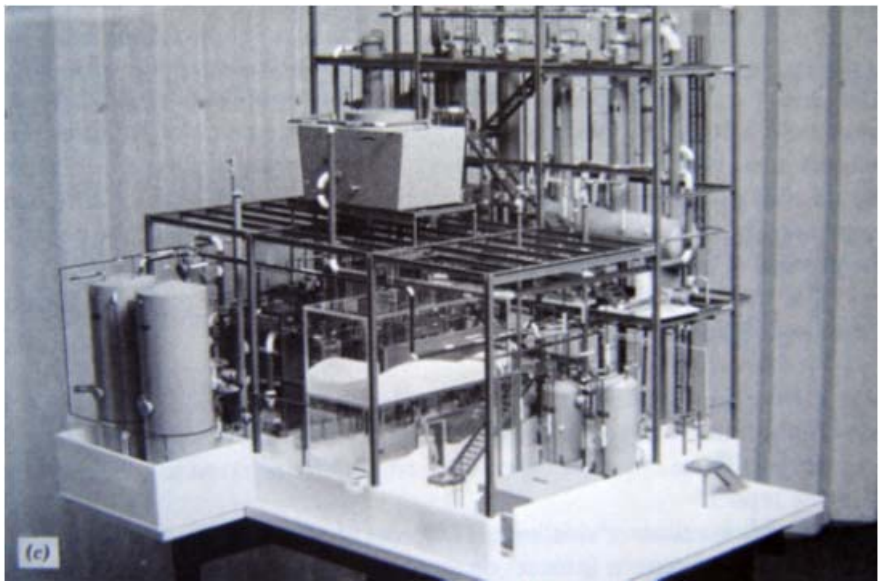


Figura 2-24: Sistema de tratamento de refugos para uma planta de processamento de lã (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 651)

Ao observar os gabaritos mostrados percebe-se que eles apenas representam os equipamentos e pessoas. Não há explicitação das áreas necessárias para utilização do equipamento. Além da geometria dos equipamentos, os gabaritos, principalmente os bidimensionais, contêm informações para identificação e caracterização. MUTHER (1976) lista as informações típicas:

- Tipo de máquina ou equipamento
- Nome do fabricante
- Estilo, modelo, tamanho ou capacidade
- Número de identificação do proprietário (*tag*)
- Dimensões transversais e altura (incluindo ponto de máxima altura)
- Posição de motores, painéis de controle, chave ou ajuste
- Posição das tomadas de eletricidade e de ar comprimido.

A representação que utiliza o conceito de centro de produção (OLIVÉRIO, 1985), mostrada na ***Figura 2-25***, procura dar conta da necessidade de considerar essas áreas, a saber: (a) equipamento, (b) operador, (c) manutenção, (d) processo, (e) materiais, (f) refugos, cavacos e resíduos, (g) movimentação e transporte, (h) serviços e utilidades, (i) dispositivos auxiliares, (j) acesso ao posto e (l) disposições legais. Como pode ser visto na ***Figura 2-25***, a área necessária pode ser consideravelmente maior do que a área do equipamento propriamente dita.

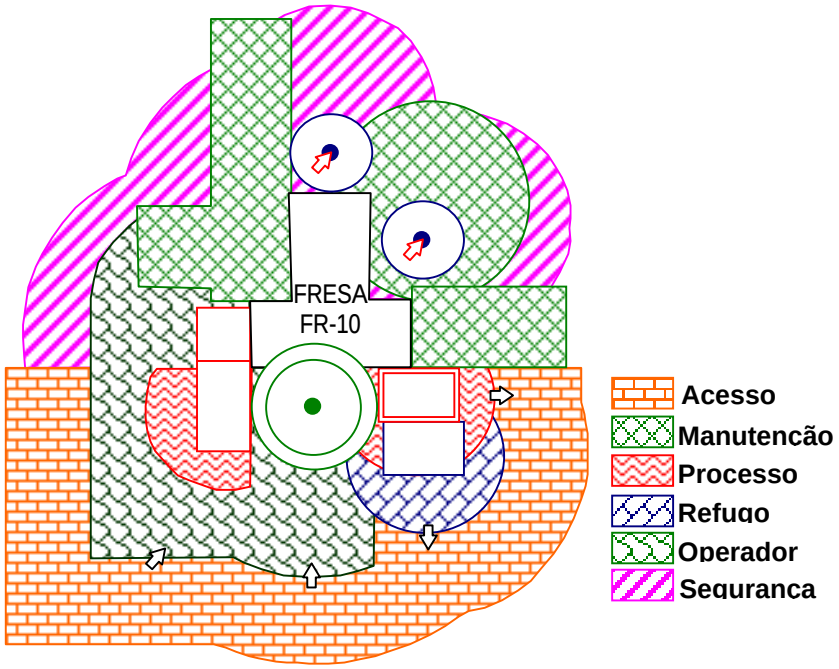


Figura 2-25: Gabarito que representa os equipamentos e as áreas necessárias para desenvolver as atividades do centro de produção (SimuCAD, 2006).

2.4 Representação das relações qualitativas de proximidade

A representação de grandes áreas visa permitir a análise do posicionamento relativo das mesmas enquanto se buscam resultados satisfatórios em termos de utilização do espaço de terreno disponível. Nos métodos de desenvolvimento do arranjo físico, os fatores que estabelecem as relações de proximidade são o fluxo esperado entre as áreas ou outros

critérios qualitativos considerados como importantes, como as relações de proximidade expressas geralmente na Carta de Relações Preferenciais (CRP). Nessa representação (***Figura 2-26***), a determinação do grau de proximidade que deve ser estabelecido entre as áreas de atividade (expresso com letras) pode ser feita como um exercício individual de cada participante do projeto ou pode ser feita coletivamente.

Em cada cruzamento das linhas é colocado o tipo de relacionamento entre as áreas usando-se um código de letras: A (absolutamente necessário), E (especialmente importante), I (Importante), O (pouco importante), U (indiferente), X (indesejável) e Z (muito indesejável). Também é registrada a razão para tal relação através de um código de razão colocado imediatamente abaixo do código de relacionamento.

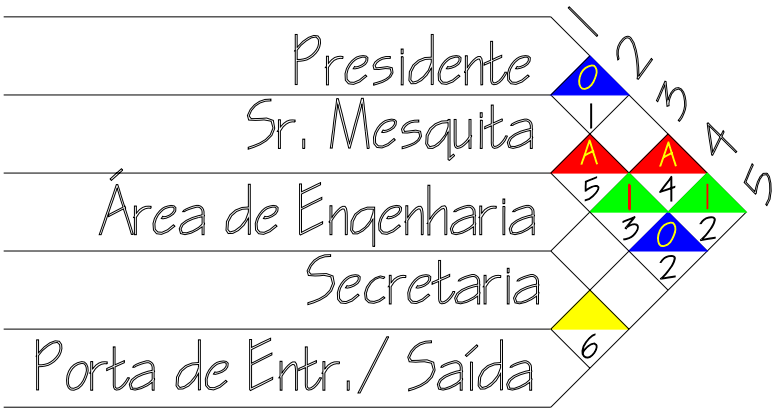


Figura 2-26: Carta de relações preferenciais.

Como exemplos de razões para a proximidade entre as áreas temos a necessidade de supervisão, o compartilhamento de equipamentos e a necessidade de comunicação. Nos programas computacionais que utilizam os dados da CRP como dados de entrada, esses valores são convertidos em valores numéricos arbitrários. Por exemplo, no CORELAP (LEE & MOORE, 1967), as relações A,E,I,O,U,X recebem os valores 6,5,4,3,2,1, respectivamente. Outro aspecto a ser notado é que proximidade refere-se ao interesse dos

decisores em colocar certas áreas próximas umas da outras e não em determinar distância percorridas.

2.5 Relações quantitativas: os fluxos entre as áreas de atividade

Como afirmado, os métodos de representação de arranjo físico se consolidaram em uma época em que o paradigma da produção em massa estava no auge, o que induziu uma sobrevalorização do fluxo de materiais em detrimento de outros fatores orientadores do arranjo físico. As ***Figuras 2-15*** e ***2-16*** mostram os fluxos que eram desenhados à mão diretamente sobre as bases de papel, ou apresentados na forma de mapofluxogramas (***Figura 2-27***). Além disso, utilizaram-se também linhas coloridas de lã sobre uma base de madeira para representar e manipular esses arranjos físicos (***Figura 2-28***).

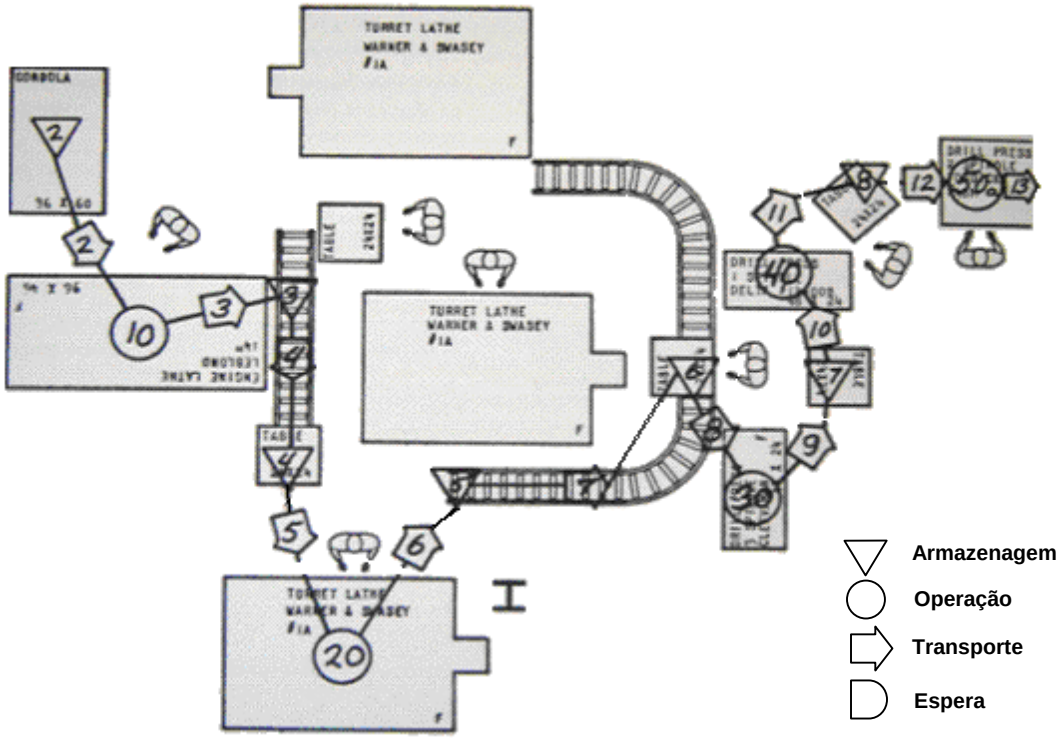


Figura 2-27: Exemplo de um mapofluxograma simples (Adaptado de APPLE, 1977, p. 270).

Observando a ***Figura 2-27*** percebemos a sobreposição de informações. Além das informações gráficas do arranjo físico, há também a representação da seqüência do

processo e do tipo de atividade realizada em cada um dos equipamentos. A simbologia utilizada é a mesma usada na chamada carta de processos e segue o padrão ASME-101 da American Society of Mechanical Engineers.

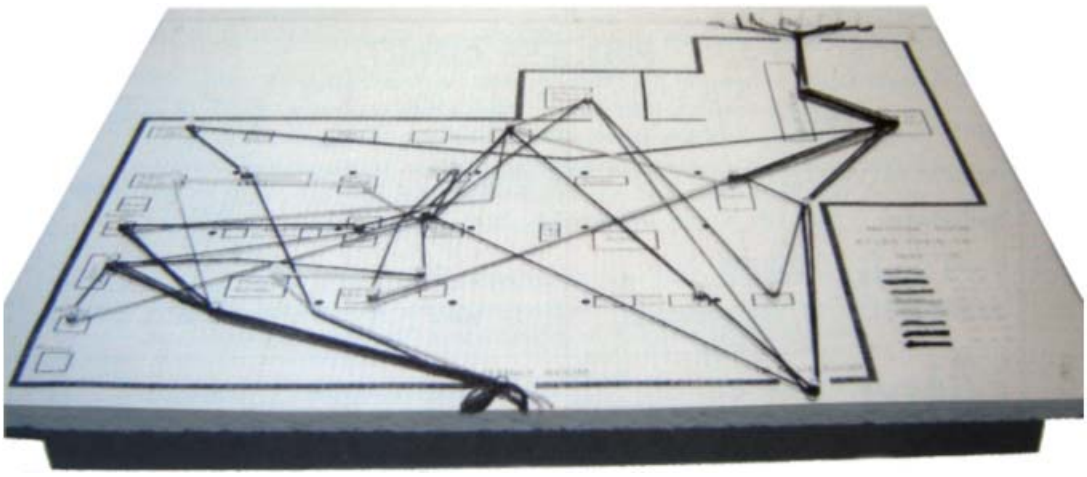


Figura 2-28: Uso de fios de lã para representar os fluxos de materiais (APPLE, 1977, p. 135).

Além dessas representações, outras formas eram usadas para representar os fluxos entre as áreas de atividade, como a Carta-De-Para (***Figura 2-29***).

DE \ PARA	1 Cortar	2 Entalhar	3 Estirar	4 Furar	5 Dobrar	6 Aplainar
1 Cortar		12		9	4	
2 Entalhar			2	7	3,56	
3 Estirar		5				
4 Furar		3	78			
5 Dobrar						
6 Aplainar	8					

Figura 2-29: Carta-De-Para (CDP).

A Carta-De-Para (CDP) serve para registrar a intensidade de fluxos de materiais entre as áreas de atividade. Através de sua análise pode-se identificar as áreas que

devem ser posicionadas próximas umas às outras de modo a reduzir o esforço de transporte de materiais entre elas.

WILDE (1996) sugere o uso da Carta de Relações Funcionais (CRF) (***Figura 2-30***), uma variação da CRP para representar relações funcionais das áreas de atividades. Basicamente, na CRF, as áreas são avaliadas quanto a (a) objetivos da área, (b) interdependência entre as áreas (c) comunicação entre as áreas e (d) treinamento e habilidades necessárias.

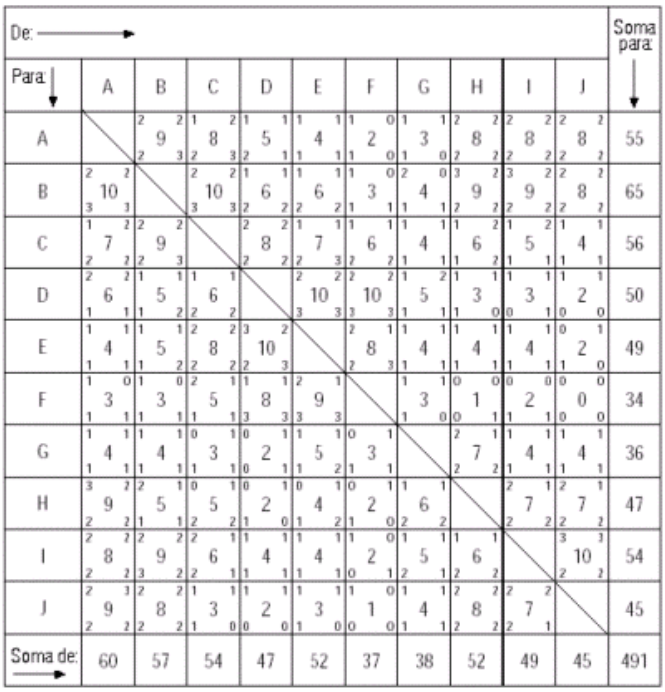


Figura 2-30: Carta de Relações Funcionais (WILDE, 1996).

Cada célula da CRF exibe nos cantos (***Figura 2-31***) os valores de cada um dos quatro critérios de avaliação e no centro o valor total desses pontos. Deve-se observar que a CRF possui a forma da Carta De-Para e pode usar seus dados, mas expressa relações qualitativas. Além disso, os valores dos critérios de avaliação podem ser diferentes, considerando a relação entre duas áreas, Por exemplo, A × B e B × A. Todas as áreas são

avaliadas quanto a esses 4 critérios e então são comparadas duas a duas, formando uma matriz de relacionamento.

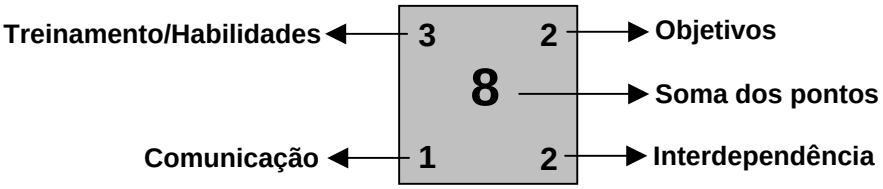


Figura 2-31: Célula da CRF-Carta de Relações Funcionais (WILDE, 1996).

Uma outra representação que pode ser usada para exprimir graficamente tanto as relações de proximidade quanto as de fluxo é o chamado Diagrama de Relaciomento (***Figura 2-32***).

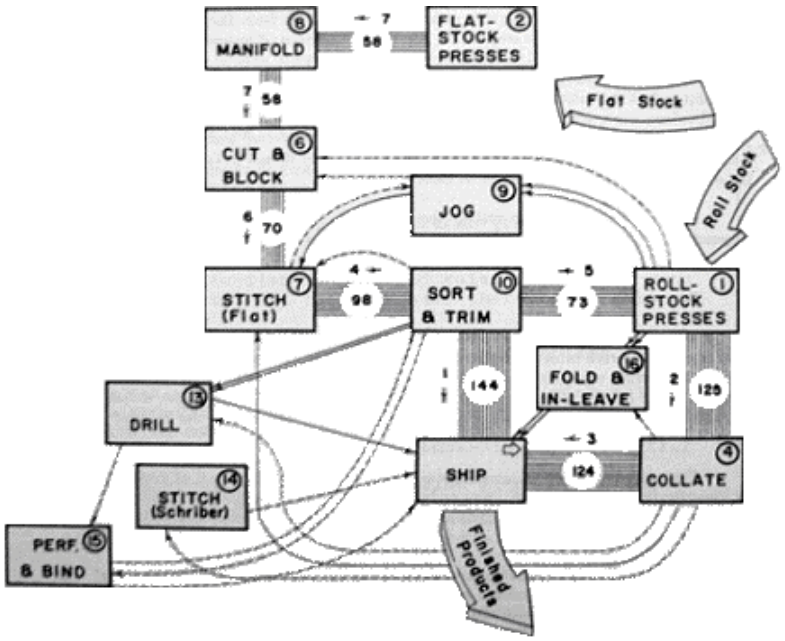


Figura 2-32: Diagrama de Relacionamento (MUTHER, 1976, p. 6-2)

Nessa representação o que se procura é a possibilidade de explicitar simultaneamente a intensidade dos fluxos e relaciomentos de modo que se possa rearranjar a posição relativa dos blocos de áreas em busca de uma solução que minimize as linhas mais

espessas. Além da espessura, o uso de cores e hachuras diferentes também ajuda a diferenciar a natureza dos relacionamentos/fluxos.

Apesar de algumas das representações mostradas se referirem aos mesmos elementos de análise da criação de arranjo físico, elas não conseguem flexibilidade e desempenho. Nessas representações, a manipulação gráfica de um conjunto de fluxos, por exemplo, não consegue ser expressa de forma simples em uma grandeza quantitativa e vice-versa. Assim, as representações têm que ser recalculadas/reconstruídas, total ou parcialmente, o que demanda esforços consideráveis. A utilização de ferramentas computacionais para sanar essa dificuldade, não apresentou ainda hoje soluções totalmente satisfatórias para o problema da manipulação do arranjo físico e sua avaliação.

2.6 Representação dos processos e sua seqüência

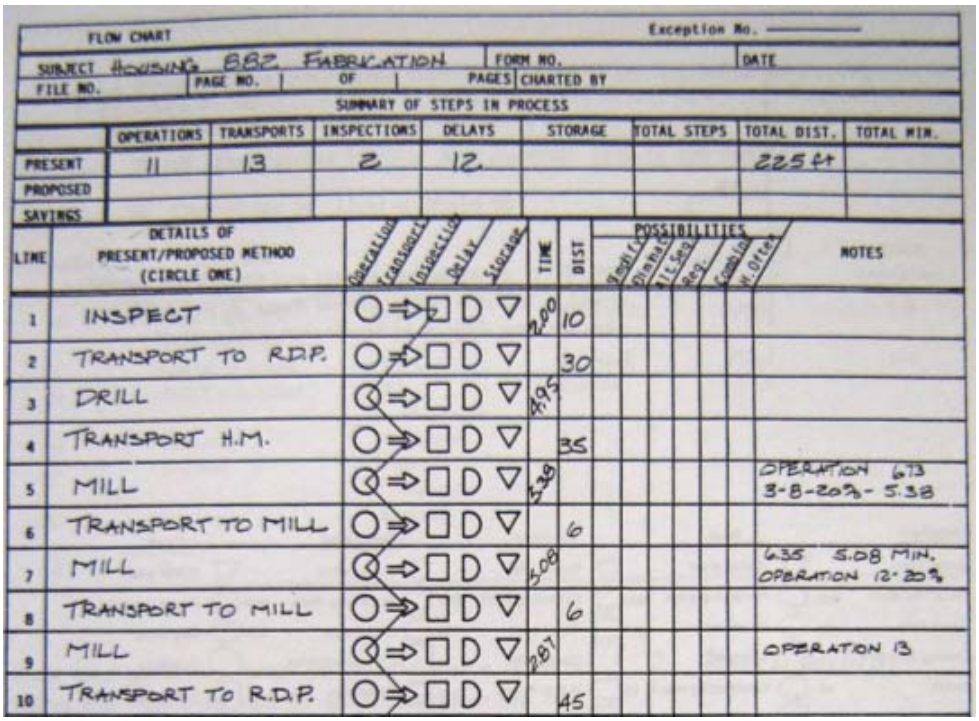
Um outro tipo de relação importante para o projeto do arranjo físico é o da seqüência do processo. Duas representações para isso são a Carta de Processos (***Figura 2-33***) e o Fluxograma de Fabricação e Montagem (***Figura 2-35***), derivados da representação introduzida por F. B. Gilbret na década de 1920 (APPLE, 1977). Ambas apresentam as operações executadas em cada etapa da fabricação do produto e são usadas para analisar o fluxo de materiais.

As funções dessas representações são (APPLE, op. cit.):

1. registrar todas as etapas do processo de fabricação de um determinado produto;
2. forçar uma avaliação detalhada dos processos;
3. ser uma base para analisar o processo: analisar todas as movimentações, armazenagens e esperas; apontar oportunidades de melhoramento; mostrar

as distâncias, equipamentos, mão-de-obra, etc e levantar questões sobre o processo;

4. familiarizar o analista intimamente com o processo;
5. formar uma base para a estimação de custos;
6. Formar uma base para a comparação de métodos alternativos.



FLOW CHART — Exception No. ——————

SUBJECT Housing BB2 FABRICATION | FORM NO. | DATE

FILE NO. | PAGE NO. | OF | PAGES | CHARTED BY

SUMMARY OF STEPS IN PROCESS

	OPERATIONS	TRANSPORTS	INSPECTIONS	DELAYS	STORAGE	TOTAL STEPS	TOTAL DIST.	TOTAL MIN.
PRESENT	11	13	2	12			225 ft	
PROPOSED								
SAVINGS								

LINE	DETAILS OF PRESENT/PROPOSED METHOD (CIRCLE ONE)	Operation / Transport / Inspection / Delay / Storage	TIME	DIST	POSSIBILITIES: Eliminate / Combine / Sequence / Simplify / Combine w. Other?	NOTES
1	INSPECT	○ ⇒ □ D ▽	2.00	10		
2	TRANSPORT TO R.D.P.	○ ⇒ □ D ▽		30		
3	DRILL	○ ⇒ □ D ▽	4.95			
4	TRANSPORT H.M.	○ ⇒ □ D ▽		35		
5	MILL	○ ⇒ □ D ▽	5.38			OPERATION 6.73 3-8-20% - 5.38
6	TRANSPORT TO MILL	○ ⇒ □ D ▽		6		
7	MILL	○ ⇒ □ D ▽	5.08			6.35 5.08 MIN. OPERATION 12·20%
8	TRANSPORT TO MILL	○ ⇒ □ D ▽		6		
9	MILL	○ ⇒ □ D ▽	2.81			OPERATION 13
10	TRANSPORT TO R.D.P.	○ ⇒ □ D ▽		45		

Figura 2-33: Carta de processos (KONZ, 1985, p. 31).

A versão múltipla da carta de processos (***Figura 2-34***) permite que as seqüências de vários processos possam ser comparadas de forma a permitir a análise do balanceamento do uso dos recursos envolvidos.

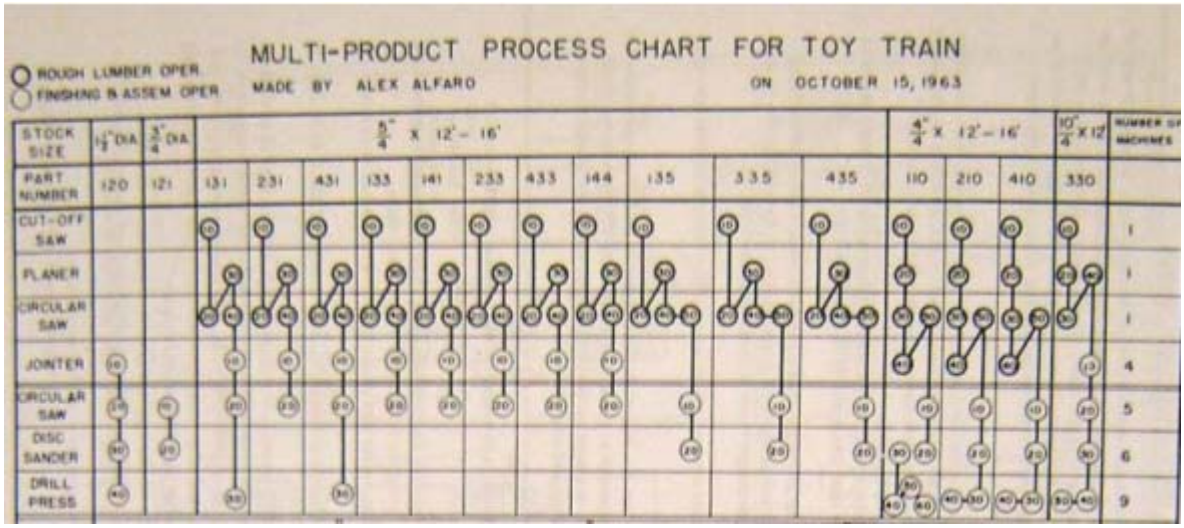


Figura 2-34: Carta de Processos Múltipla (APPLE, 1977 , p. 134).

Uma outra representação (***Figura 2-35***) da seqüência de processo é o Fluxograma de Fabricação e Montagem (FFM). As informações contidas nessa representação são basicamente as mesmas da Carta de Processos.

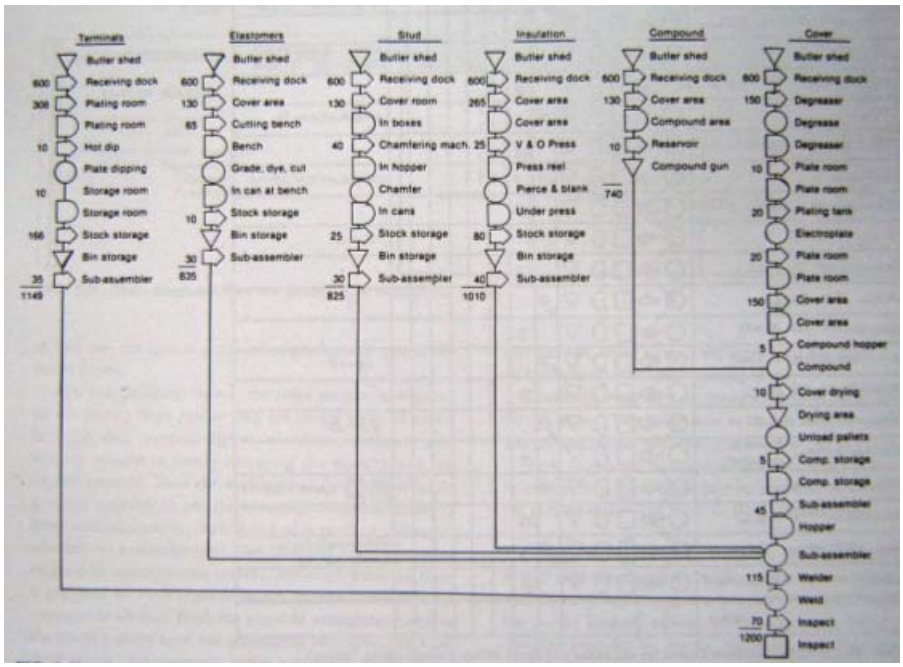


Figura 2-35: Fluxograma de Fabricação e Montagem (KONZ, 1977, p. 32)

2.7 Relações quantitativas temporais

2.7.1 Gráfico de Gantt e PERT

O Gráfico de Gantt e a rede PERT são duas técnicas que têm sido usadas para registrar os tempos e seqüências de tarefas de projeto e de execução de etapas de produção.

O gráfico inventado por Gantt em 1917, mostra o tempo de execução de tarefas como uma barra horizontal. Quando uma tarefa depende de outra para começar, sua barra é colocada depois do final da barra da tarefa independente (***Figura 2-36***). Além dessa relação de precedência, opcionalmente podem ser indicados também o início e o término esperados de cada tarefa.

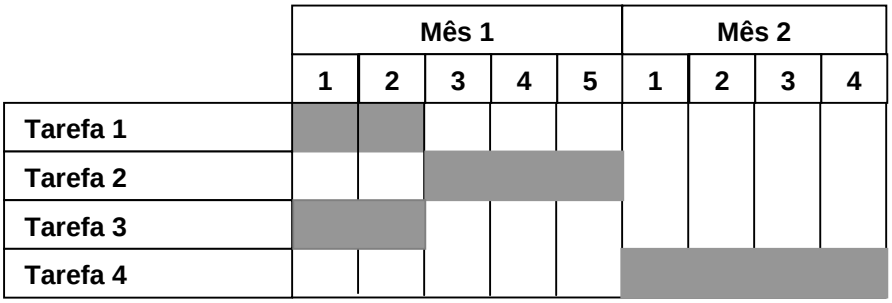


Figura 2-36: Exemplo de gráfico de Gantt.

A rede PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) (HIRSCHFELD, 1985), foi desenvolvida na década de 1950 para avaliar os tempos de tarefas de projeto. Basicamente apresenta as mesmas informações do gráfico de Gantt. Nessa rede, os nós podem representar as tarefas e os arcos podem representar a sua duração. A

Figura 2-37 mostra a rede PERT para o exemplo da ***Figura 2-36***.

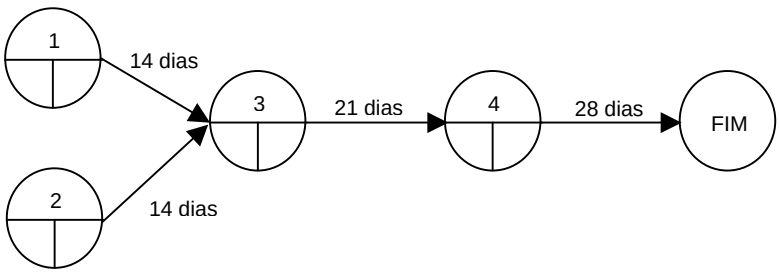


Figura 2-37: Exemplo de rede PERT.

2.7.2 Mapeamento de fluxo de valor

O objetivo da mentalidade enxuta (WOMACK & JONES, 1998; ROTHER & HARRIS, 2002) é a criação de um fluxo de produção *contínuo*, isto é, que não apresente alterações bruscas. A aplicação da mentalidade enxuta provoca alterações na organização do trabalho, nos processos de fabricação e na organização do arranjo físico (ROTHER & HARRIS, op. cit.; CORIAT, 1994).

O Mapa de Fluxo de Valor (*Value Stream Map*) é uma das representações mais recentes para os processos de fabricação e principal representação usada para guiar o processo de busca por oportunidades de melhoria. Quando aplicada ao chão-de-fábrica, essa representação se assemelha bastante à Carta de Processos e ao FFM em termos informacionais (***Figura 2-38***). No processo de mapeamento são criados os mapas das situações correntes e mapas de situações futuras com indicação de mudanças na situação corrente.

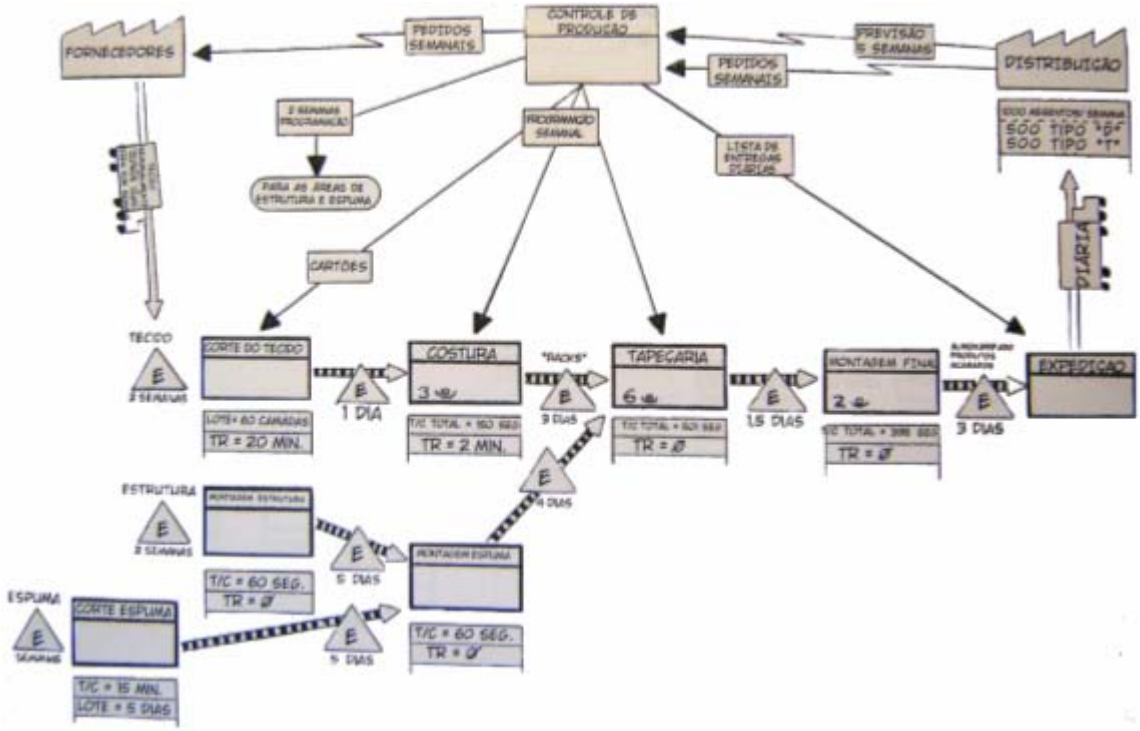


Figura 2-38: Mapa de Fluxo de Valor (ROTHER & SHOOK, 1998).

O traço mais marcante é o objetivo de uso e está claro no título do principal livro de divulgação dessa técnica: aprender a enxergar (ROTHER & SHOOK, 1998) os tempos perdidos em atividades que não agregam valor ao produto. Algumas diferenças, no entanto, são de interesse para a discussão das representações:

a) usar a representação do processo para disparar um processo de mudança a partir da identificação de oportunidades de ganho. A própria representação possui ícones para assinalar no MFV os pontos de possíveis melhorias. Além disso, os mapas pressupõem pelo menos dois estados: o atual (de avaliação) e o do estado futuro (considerando as técnicas “enxutas”); A preocupação com o tempo, representados nos processos e nos estoques;

b) incluir, embora de maneira pobre, os processos informacionais (colocados na parte superior do mapa). Por outro lado, a troca de informações entre os postos através de cartões (*kanban*) é tratada de forma mais detalhada;

c) procurar representar famílias de produtos e não os produtos individualmente;

d) usar mais intensivamente ícones para facilitar o entendimento por mais pessoas e para representar as diversas opções e detalhes.

O uso inadequado ou restrito de uma representação como essa pode causar uma simplificação que pode ter conseqüências importantes para os projetos de instalações como impactos sobre a saúde dos trabalhadores, dimensionamento incorreto de recursos, entre outros (TORRES et al., 2004).

2.8 Representações computacionais do arranjo físico

A disponibilidade cada vez maior de computadores fez com que eles fossem utilizados para facilitar a representação de soluções de arranjo físico. As representações

bidimensionais (***Figura 2-39***) foram as primeiras a serem transpostas para o uso em computadores, notadamente através do desenvolvimentos do conceito e de programas computacionais de CADD (Desenho e Projeto Auxiliado por Computador). Com a evolução dessas ferramentas, que se tornaram mais poderosas e amigáveis, as representações tridimensionais também se tornaram mais comuns, com maior ou menor capacidade de representação dos detalhes do arranjo fisico.

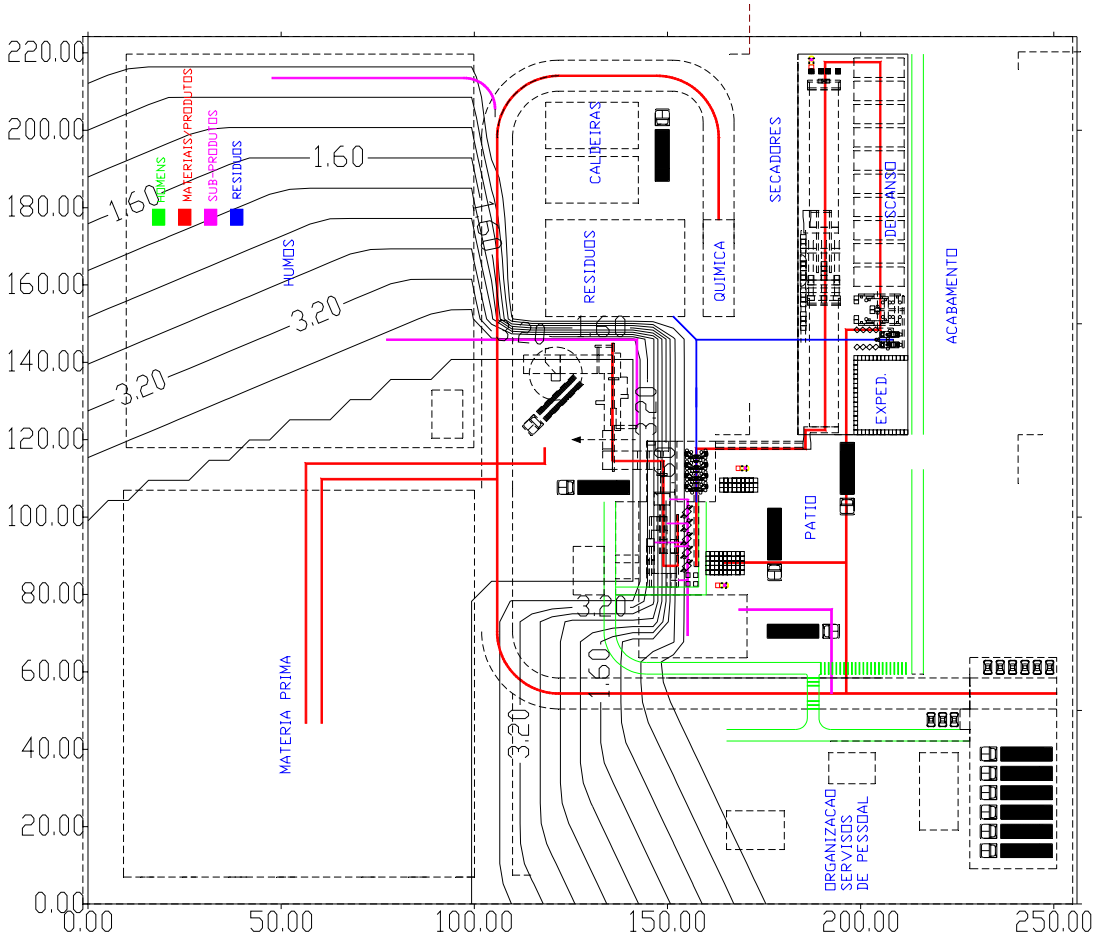


Figura 2-39: Representação em CADD de uma unidade agroindustrial (SIMUCAD, 2006)

Essa evolução teve duas dimensões básicas:

a) A possibilidade de representação de soluções detalhadas em duas e três dimensões, o que permitiu que as ferramentas passassem a ser usadas durante mais etapas do processo do arranjo físico;

b) A possibilidade de manipular as soluções no próprio computador. Apesar de limitada, essa capacidade alterou a forma de uso das representações computacionais;

Além de criar os arranjos, o projetista pôde detalhar instalações hidráulicas, elétricas, os detalhes de declividade do terreno etc (***Figura 2-39***)

As representações computacionais tradicionais em CADD (***Figura 2-40***) e tridimensionais renderizadas (***Figura 2-41***) conseguem conter informações visualmente explícitas como as de fluxo, as de forma, a de posição e outras implícitas, como as de seqüência de produção.

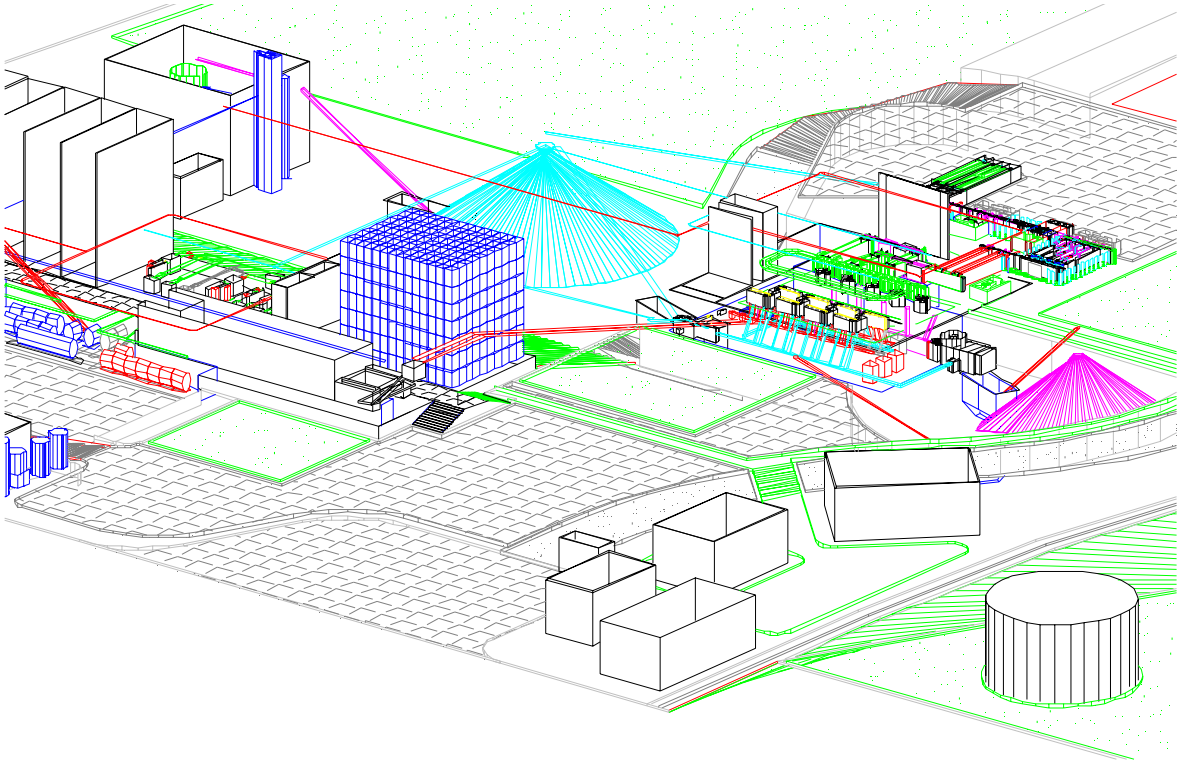


Figura 2-40: Representação tridimensional em CADD de uma unidade agroindustrial (SIMUCAD, 2006)

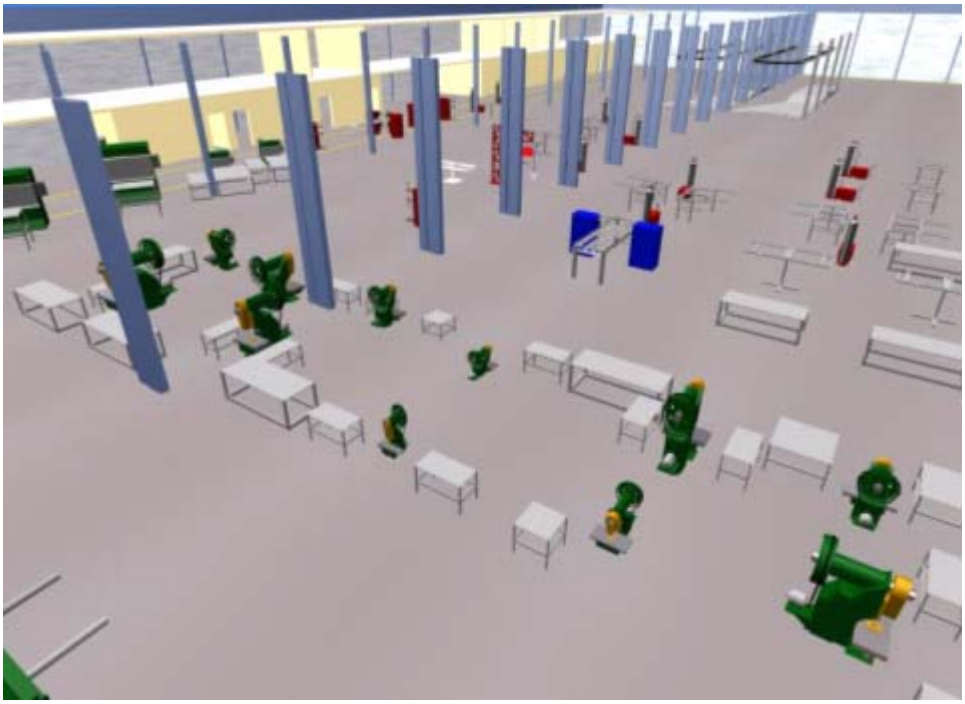


Figura 2-41: Representação tridimensional renderizada da planta de uma fábrica de esquadrias metálicas (SIMUCAD, 2006)

2.8.1 Representações gráficas de soluções analíticas

As primeiras representações computacionais com viés analítico não permitiam a manipulação do arranjo físico e não eram sequer gráficas. Um exemplo disso (***Figura 2-42***) eram os arranjos físicos produzidos pelo *software* CORELAP (LEE & MOORE, 1967). Nesse tipo de programa computacional, os agrupamentos de números indicavam a forma e o tamanho das áreas, o que dificultava a visualização da alternativa.

```
0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 0
0 0 0 1 0 0 0 0 2 2 2 0
0 0 0 1 1 1 2 2 2 2 2 2
0 0 0 1 1 1 2 2 2 2 2 2
0 0 0 1 1 3 3 3 8 8 8 8
0 0 0 1 1 3 3 4 4 8 8 8
0 0 5 5 5 6 6 9 4 4 7 7
0 0 5 5 5 6 6 9 4 4 7 7
```

Figura 2-42: Exemplo de arranjo físico gerado com o CORELAP.

Com o avanço do uso dos computadores pessoais, representações como as mostradas nas ***Figuras 2-43 e 2-44*** exibiam saídas gráficas além da possibilidade de manipular o arranjo físico. O arranjo era representado apenas por blocos e a manipulação era feita através da especificação de dois departamentos que deveriam ser trocados um pelo outro no arranjo físico. Através do teclado, o usuário fornecia os números dos departamentos que deveriam ser trocados.

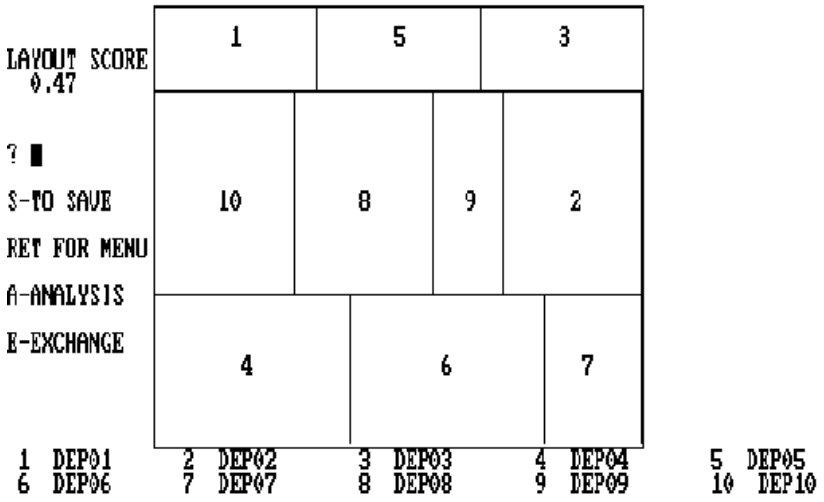


Figura 2-43: Exemplo de arranjo gerado no BLOCPLAN (DONAGHEY, 1986), um programa para arranjo de blocos.

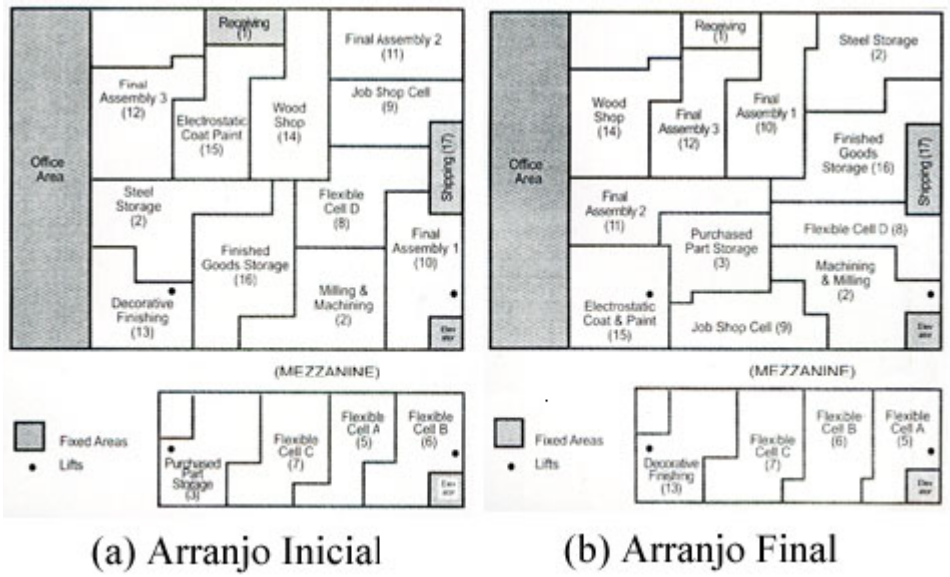


Figura 2-44: Saída gráfica do programa LayOPT (GRAJO & BOZER, 1997).

Esse tipo de representação é comum em implementações computacionais desenvolvidas com o intuito de exibir os resultados da aplicação de métodos computacionais do problema do arranjo físico. Esporadicamente alguns desses programas foram comercializados por empresas de consultoria, como no caso do LayOPT (***Figura 2-44***), mas são bastante limitados quando comparados com os pacotes computacionais que foram desenvolvidos comercialmente.

2.8.2 Pacotes computacionais para arranjo físico

Nesta seção serão apresentados dois pacotes computacionais dedicados ao desenvolvimento de projetos de arranjo físico de instalações industriais. Esses sistemas apresentam-se como os mais completos do mercado, capazes de melhorar a produtividade das equipes de desenvolvimento, principalmente pelas facilidades de uso e acesso a bases de dados. Os aumentos dos custos do planejamento e a sobrecarga dos planejadores pode levar, em muitos casos, a uma má organização do trabalho. O uso dessas ferramentas computacionais pode auxiliar nesse caso, permitindo economias financeiras, redução de tempo e melhorias ergonômicas para quem planeja e para quem usa o resultado do planejamento. Esse tipo de programa computacional usa geralmente como princípios norteadores para a determinação de soluções: (a) o menor tempo de entrega; (b) a redução do custo operacional; (c) o uso otimizado da capacidade existente e (d) a otimização dos fluxos de material e informação.

2.8.2.1 DELMIA Layout Planner

Esse programa computacional (DELMIA, 2006) apresenta-se como uma ferramenta para o desenvolvimento de planejamento total do arranjo físico. É composto por módulos dedicados (**QUADRO 2**), que são integrados através da troca de dados em um módulo principal.

Os pontos fortes desse sistema segundo seu fornecedor são: a) possuir uma base de dados com modelos de equipamentos disponíveis comercialmente que possibilitam construir arranjos físicos tridimensionais; b) disponibilizar as análises ergonômicas e as de comparação dos arranjos de acordo com as necessidades do usuário; c) analisar o fluxo de materiais; d) definir fórmulas e procedimentos personalizados para automatização do programa e e) a possibilidade de analisar o arranjo físico mesmo sem a sua geometria.

Módulo	Características
PPR Navigator	Exibe dados de Produtos, Processos e Recursos envolvidos na planta em uma árvore. Esses dados são disponibilizados para os demais módulos durante o desenvolvimento das alternativas de arranjo físico.
Arranjo físico do posto de trabalho	Permite editar e arranjar os recursos necessários do posto de trabalho. Dá acesso a uma base de dados com máquinas e equipamentos disponíveis comercialmente e que podem ser inseridos no arranjo físico do posto de trabalho. Os blocos criados são automaticamente atualizados como as referências de blocos de programas de CADD. Ao atualizar o bloco original, todos os demais são atualizados automaticamente.
Funções de Ergonomia	Permite analisar campos de visão e áreas de alcance para vários percentis da população de operários. As funções de análise servem para avaliar os excessos de acordo com limites estabelecidos em normas como DIN 33406, NIOSH (levantamento de cargas) e REFA (manuseio de cargas).
Análise de Tempo	Disponibiliza métodos para estimativa de tempos e estudos de movimento. Permite a criação de fórmulas personalizadas para cálculo do tempo e que a análise do tempo seja feita em conexão direta com o cronograma de trabalho.

QUADRO 2: Módulos componentes do Layout Planner.

Nesse sistema, o arranjo físico global é a soma dos arranjos dos postos de trabalho. Isso implica no uso do programa a partir dos detalhes do chão-de-fábrica para então analisar os aspectos macroscópicos do arranjo físico, em uma abordagem chamada de *bottom-up* ou ascendente (***Figura 2-45***).

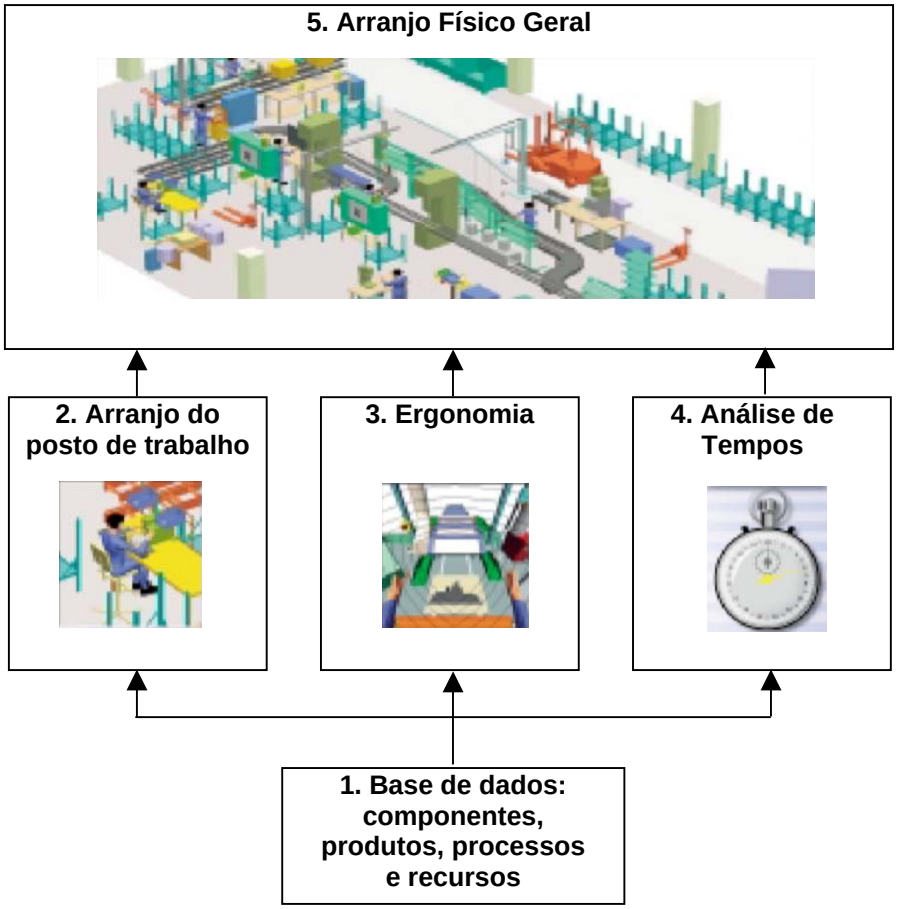

5. Arranjo Físico Geral
2. Arranjo do posto de trabalho
3. Ergonomia
4. Análise de Tempos
1. Base de dados: componentes, produtos, processos e recursos

Figura 2-45: Abordagem ascendente usada pelo sistema da DELMIA.

2.8.2.2 Factory

Um avanço importante nas representações computacionais analíticas de arranjo físico foi o *software* Factory desenvolvido por David P. Sly na universidade de Iowa, nos EUA. O *software* foi desenvolvido para dar suporte às necessidades gráficas do sistema SLP (MUTHER, 1978). Atualmente o sistema é comercializado no pacote computacional VisFactory (SLY, 1998) e também no pacote ProPlanner (PROPLANNER, 2006).

O sistema funciona acoplado ao *software* AutoCAD (AUTODESK, 2006) e é composto de três módulos (TORRES, 1998):

a) FactoryCAD, que possui rotinas automatizadas para inserir alguns dispositivos de materiais parametrizáveis como colunas, paredes, etc. Possui também uma vasta biblioteca de equipamentos e dispositivos de manuseio de materiais;

b) FactoryFLOW, que avalia um arranjo físico com base no seu fluxo de materiais que pode ser expresso em termos de viagens ou dos custos associados. Sobre a planta são desenhadas linhas de espessura correspondente à intensidade do fluxo enquanto as cores representam o tipo de produto;

c) FactoryOPT, que utilizando a heurística SPIRAL (GOETSCHALCKX, 1992) cria um diagrama de blocos otimizado a partir de relações de proximidade e dados de fluxo;

O uso do Factory se justifica por ser um conjunto de ferramentas de arranjo físico de fato e não ser baseado em apenas um algoritmo como o LayOPT (GRAJO & BOZER, 1997). Como utiliza as funcionalidades de um *software* de CADD, permite a edição dos arranjos (enquanto meros desenhos técnicos) para a obtenção da planta final do projeto da instalação. Para funcionar adequadamente o software possui uma série de convenções e padrões (SLY, 1996) além daqueles do sistema SLP (MUTHER, 1978). As ***Figuras de 2-46 a 2-48*** mostram as etapas envolvidas para a alteração de um arranjo físico, onde duas áreas de atividade (WC9 e WC10) são reposicionadas no interior de uma edificação.

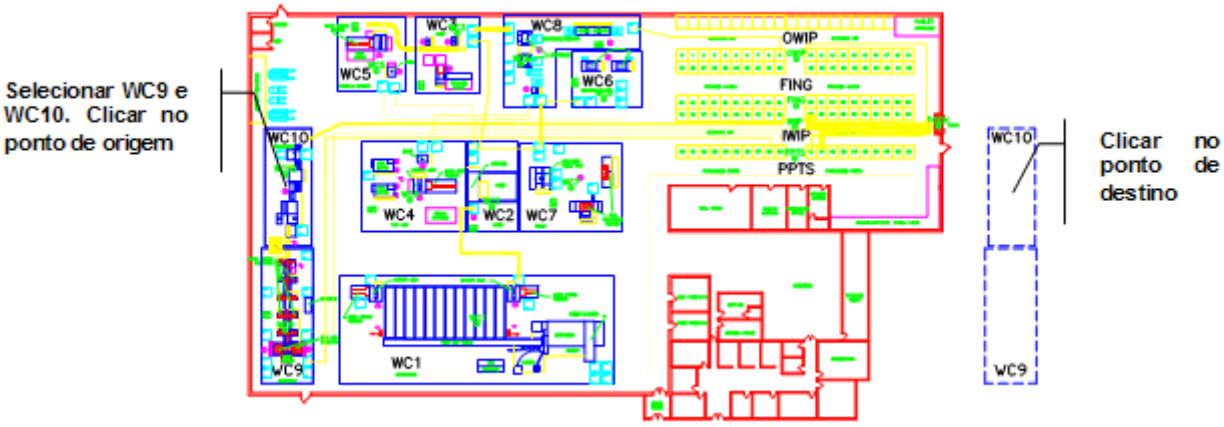


Figura 2-46: Passo 1 para alteração de arranjo no Factory: abrir espaço no interior da edificação movendo as áreas WC9 e WC10 (Fonte: CIMTECHNOLOGIES, 1995, p. 36)

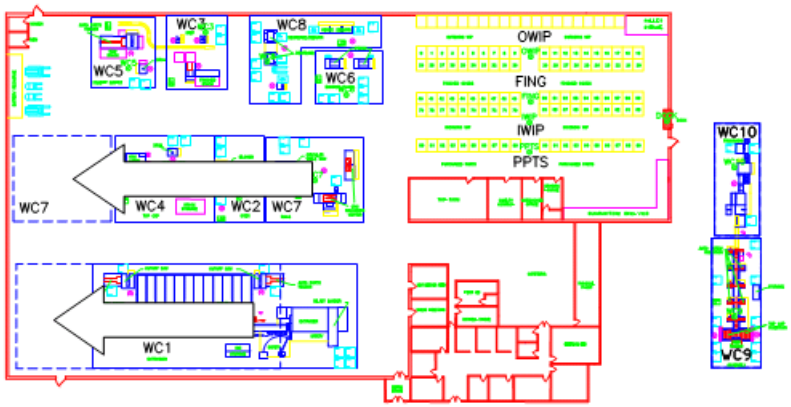


Figura 2-47: Passo 2 para alteração de arranjo no Factory: mover as área de atividade WC1 e WC7 (Fonte: CIMTECHNOLOGIES, 1995, p. 37)

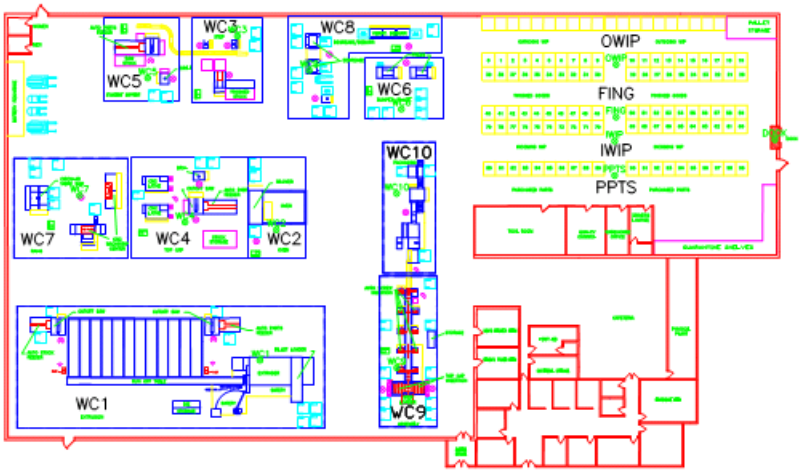


Figura 2-48: Passo 3 para alteração de arranjo no Factory: recolocar as áreas de atividade WC9 e WC10 no interior da edificação (Fonte: CIMTECHNOLOGIES, 1995 , p. 38)

Após a alteração do arranjo fisico, os módulos de cálculo de fluxo e de otimização apresentam os resultados da modificação e geram relatórios como o mostrado na ***Figura 2-49***. Além disso, são desenhadas linhas de fluxo que representam a intensidade do fluxo através da sua espessura (***Figura 2-50***). Para calcular esses fluxos são usados os seguintes dados: (a) Quantidade de produtos, (b) Tipos de peças e submontagens, (c) Dados sobre as rotas dessas peças (origem, destino, dispositivo de manuseio, quantidade transportada, (d) Dados dos dispositivos de manuseio (custos fixos e variáveis, disponibilidade, velocidade e eficiência) e (e) Dados sobre máquinas (capacidade, disponibilidade e taxa de refugo). Os cálculos realizados pelo *software* Factory encontram-se detalhados no **Apêndice A**.

COMPANY NAME: ACME
PROJECT NAME: LADDER
DATE: 01/04/1995
TIME: 14:26

MATERIAL HANDLING REPORT

By Workcenters

Time unit: YEAR

	Distance	Cost	Intensity
Between RECEIVING and ASSEMBLY	1,011,594 Ft.	$ 7,958	3,000 Moves
Between RECEIVING and EXTRUDE	584,067 Ft.	$ 1,516	1,750 Moves
Between EXRUDE and WEAT	0 Ft.	$ 2,920	1,250,000 Moves
Between WEAT and RAILS	572,357 Ft.	$ 4,561	10,000 Moves
Between RAILS and ASSEMBLY	1,417,499 Ft.	$ 5,815	10,000 Moves
Between WEAT and STEPS	640,091 Ft.	$ 5,232	11,538 Moves
Between STEPS and ASSEMBLY	3,205,685 Ft.	$ 9,040	11,538 Moves
Between ASSEMBLY and PACKING	0 Ft.	$ 3,420	250,000 Moves
Between PACKING and SWIPPING	1,893,548 Ft.	$ 6,522	10,000 Moves
Between RECEIVING and PACKING	675,023 Ft.	$ 2,966	3,000 Moves
Grand Total	9,999,864 Ft.	$49,951	1,560,827 Moves

Figura 2-49: Relatório de fluxos gerado pelo software FactoryFLOW (CIMTECHNOLOGIES, 1995 , p. 22-23)

O Factory concentra-se apenas na quantificação dos fluxos de materiais e na análise das relações de matrizes de relacionamento para avaliar uma solução de arranjo fisico. O sistema não indica automaticamente uma das soluções, cabendo ao usuário decidir. Além

disso, o sistema não possui formas de avaliação da usabilidade dos postos de trabalho. Para suprir essas funcionalidades, a empresa UGS (UGS, 2006) incorporou no seu pacote VIS-Factory o programa de simulação humana JACK passou a ser chamado de VIS-JACK. Atualmente esses programas compõem o Tecnomatix Suite.

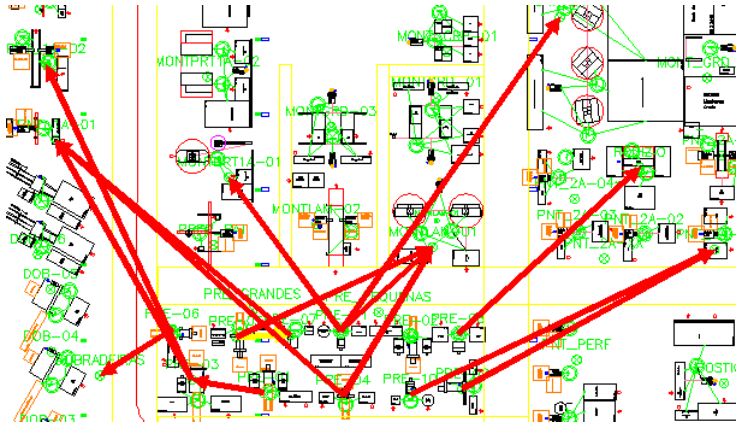


Figura 2-50: Exemplo de arranjo de uma fábrica de esquadrias metálicas manipulado no Factory (SimuCAD, 2006).

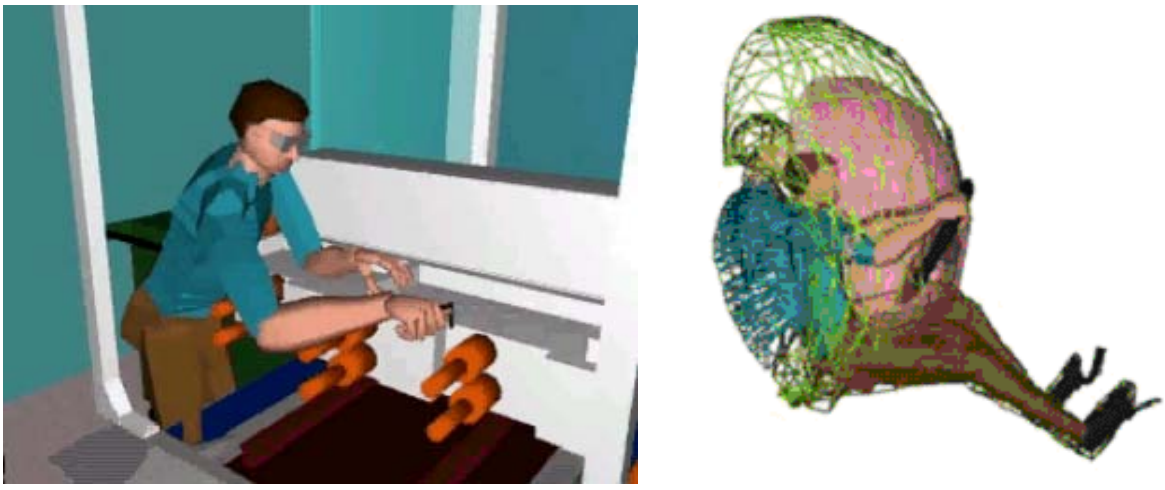
Uma outra característica acrescida ao VIS-Factory foi a possibilidade de utilização de blocos inteligentes que têm associados a si informações como taxas de refugo, capacidade, quebras etc. Apesar disso, deve-se destacar que os demais dados relativos à análise dos arranjos físico encontram-se dispersos no sistema, armazenados em vários arquivos de vários formatos. Não existe um arquivo de análise de soluções de arranjo físico.

2.8.3 Avaliação de arranjos físicos de postos de trabalho através da simulação humana

Uma outra forma de representação que está relacionada com o arranjo físico espacial dos recursos de transformação é a chamada simulação humana. Essas ferramentas computacionais além de analisar os aspectos dinâmicos da execução da tarefa (como movimentos, velocidade e consumo calórico) possuem funcionalidades para analisar a

interação entre uma pessoa (representada por um modelo tridimensional chamado de manequim) e o local onde desenvolve suas atividades de trabalho.

As ferramentas mais avançadas como o JACK (BADLER et al., 1993) permitem a análise de ambientes tridimensionais bastante complexos (***Figura 2-51-a***). Essas análises incluem também a possibilidade de analisar o posto de trabalho sob o ponto de visão do manequim e os limites de alcance corporais, chamados de envelopes. A ***Figura 2-51-b*** mostra a comparação entre os envelopes de dois indivíduos de tamanhos diferentes ocupando uma mesma posição de trabalho.



(a) **(b)**

Figura 2-51: Simulador humano Jack pode modelar interações dimensionais complexas e analisar limites de alcance (TRANSOM, 2001).

Além do nível de adequação do manequim às posições de desenvolvimento das atividades de trabalho, podem ser analisados os centros de produção compostos por vários postos de trabalho (***Figura 2-52***). Os cálculos dos envelopes e as demais funcionalidades são baseados em um manequim bastante detalhado, onde o corpo é modelado com uma série de segmentos articulados que procuram reproduzir o comportamento cinesiológico de uma pessoa.

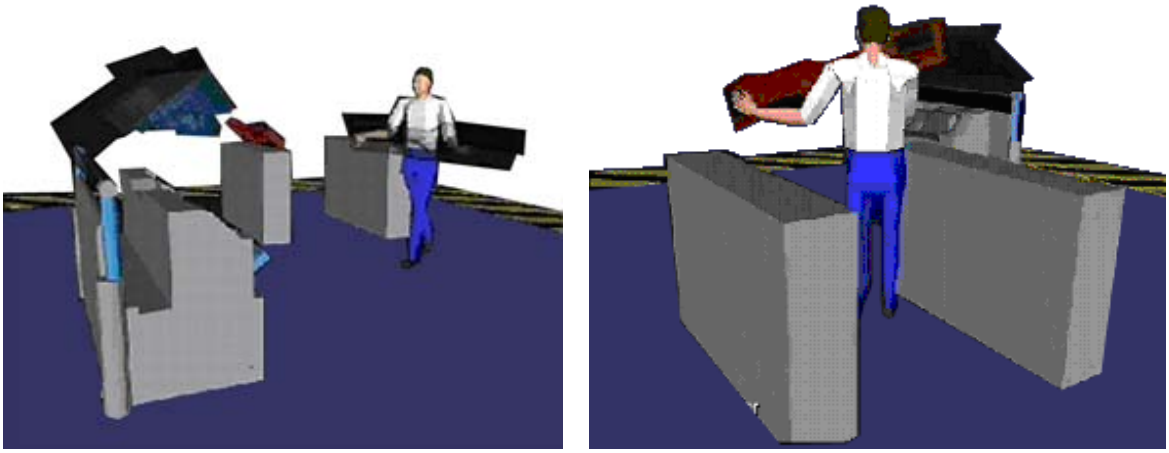


Figura 2-52: Centro de produção modelado no simulador humano JACK (TRANSOM, 2001).

Apesar da possibilidade de alterar os parâmetros antropomórficos desse modelo humano, alterar a estrutura do próprio modelo não é possível. Uma outra limitação é a impossibilidade de associar dados aos demais objetos da cena que descreve um posto de trabalho, por exemplo.

O *software* ERGO (DELMIA, 2006) integra o sistema de softwares comercializado pela empresa DELMIA do grupo Dassault Systèmes. As capacidades de análise são comparáveis às do JACK: análise de área de trabalho, áreas de alcance através de envelopes, análise do campo de visão e análise de esforços (***Figura 2-53***). Tanto o ERGO como o JACK seguem normas como NIOSH (ex.: manuseio de cargas), DIN (ex.: dimensões dos postos de trabalho) etc.

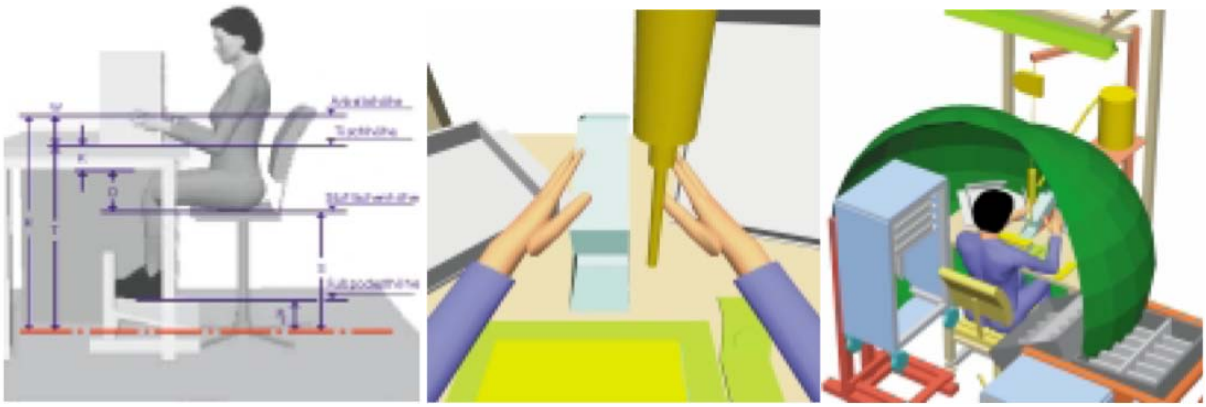


Figura 2-53: Exemplos de análises do ERGO: (a) Dimensionamento normatizado do posto de trabalho, (b) Análise de campo de visão e (c) Análise de alcance através de envelopes (DELMIA, 2006).

Existem outros simuladores humanos. PORTER et al. (1994) apresentam uma revisão sobre essas ferramentas, mais especificamente ANYBODY, CADKEY e MANNEQUIM. Outros sistemas são o ERGO (NAYAR, 1996) e SANTOS (FARREL, 2005). Quanto a esse, apresenta-se como um manequim bem avançado (***Figura 2-54***) em relação aos demais, recebendo fortes investimentos da área militar dos EUA. No entanto, o foco das pesquisas é o manequim em si e não o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de analisar arranjos físicos.

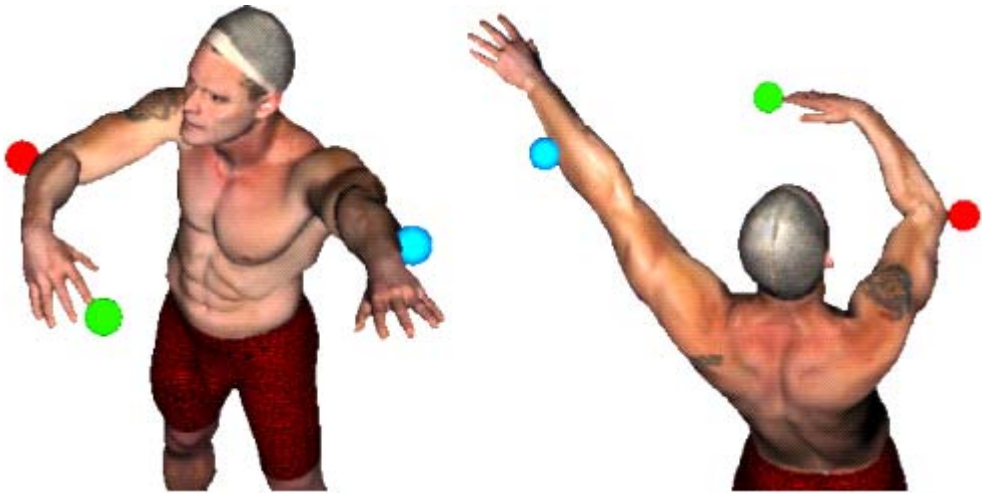


Figura 2-54: SANTOS, um simulador humano avançado (FARREL,2005, p. 61).

O SANTOS incorpora uma série de recursos computacionais que tornam o seu uso mais fácil. Um exemplo da evolução em relação ao JACK, por exemplo, é a facilidade para fazer o manequim pegar um objeto. No JACK o responsável pela modelagem é obrigado a manipular as juntas até conseguir a posição de pega. A partir daí o mecanismo chamado de cinemática invertida calcula a posição das outras partes do corpo do manequim. No SANTOS, basta especificar o objeto a ser atingido. Após isso, os recursos de inteligência artificial e a cinemática invertida irão fazer com que o manequim pegue o objeto, mesmo em movimento.

2.9 Interfaces baseadas em realidade virtual e potencial de uso para softwares *de projetos de instalações industriais*

A Realidade Virtual não possui uma definição consensual mas pode ser entendida como uma forma avançada de interação com representações da realidade, tão complexas como ela, geradas e mantidas por sistemas computacionais (NETTO et al., 2002). As técnicas de RV pretendem que as sensações multi-sensoriais do indivíduo levem-no a crer que está imerso em um outro mundo que não a sua realidade, o que exige, além de mecanismos de manipulação do modelo, sistemas que estimulem os sentidos do usuário.

Há algum tempo se procura identificar as possibilidades de uso da realidade virtual em aplicações industriais, tanto de *softwares* específicos como de produtos comerciais. Também a indústria da diversão eletrônica tem sido considerada como um fator importante para a evolução dessas ferramentas contribuindo com aprimoramentos como: (a) sincronização de som e ação, (b) aumento do grau de interatividade, (c) criação de elementos autônomos que atuam sem a necessidade de interferência do usuário, (d) ferramentas para coleta de informações (com altos graus de inteligência) em ambientes espaciais naturais. Apesar dos sistemas imersivos, em que o indivíduo se sente dentro de um ambiente próximo ao natural, existe ainda a necessidade de aprender a interagir com o ambiente (RESSLER, 1995).

O uso de ambientes virtuais como interfaces é importante pois permite a organização de itens ao redor do usuário, como acontece com uma mesa de trabalho (***Figura 2-55***) onde os objetos reais são colocados, muitas vezes, de forma a facilitar o acesso às informações.

Figura 2-55: Espaços de trabalho são organizados como dispositivos espaciais de acesso a funções e informações (RESSLER, 1995).

Esse uso dos objetos e espaços em que estão inseridos como forma de organizar informações também está presente nos artefatos de arranjo físico, seja através dos gabaritos tridimensionais ou em um *software*. O modelo com o qual se trabalha em arranjo físico constitui em si o próprio espaço de trabalho de quem manipula o arranjo físico. Por exemplo, um analista pode resolver trabalhar com os centros de produção que considera como os mais importantes e por isso os coloca na parte central do seu espaço de trabalho. Para isso, posiciona os demais centros de produção na periferia do arranjo físico, de forma que possa concentrar-se apenas no que lhe interessa.

No ambiente virtual, esse tipo de metáfora pode ser usado, por exemplo, para associar informações a objetos, edifícios etc. (***Figura 2-56***). Esses locais podem ser transformados em objetos virtuais e armazenados onde o usuário possa se lembrar deles. Por exemplo, as plantas em CAD de uma fábrica podem estar "guardadas" em uma mapoteca de um escritório virtual.

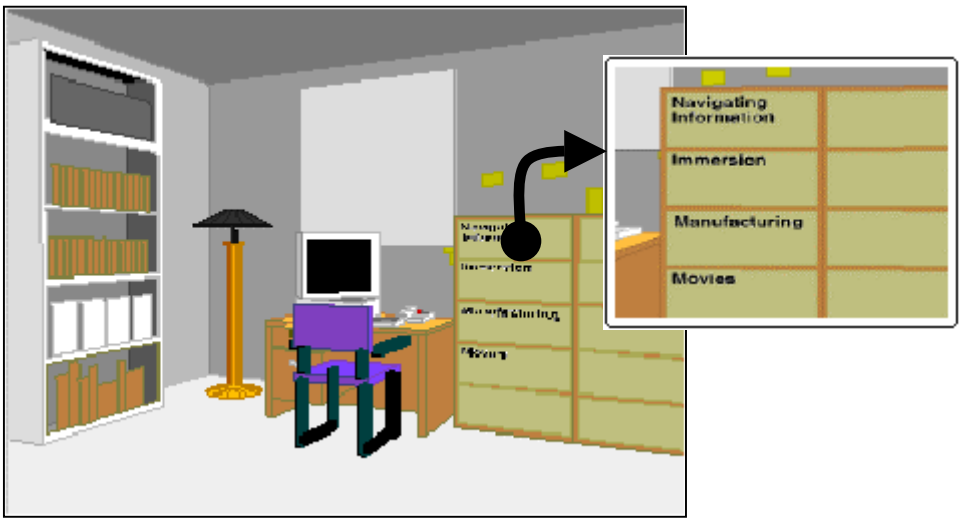


Figura 2-56: Interfaces virtuais podem usar metáforas para acesso a informações (adaptado de RESSLER, 1995)

Apesar dessas tendências, poucas aplicações de RV ao projeto de instalações industriais exploram as possibilidades que a tecnologia disponibiliza atualmente. Um exemplo disso é o trabalho de IQBAL & HASHMI (2001). O arranjo físico (***Figura 2-57***) foi criado no ambiente de RV, mas os métodos de análise aplicados foram os métodos tradicionais de solução de arranjo físico baseados em fluxo de materiais, carta e diagrama de relacionamentos desenvolvidos externamente ao ambiente. O principal uso do modelo, no caso, foi a validação qualitativa visual de arranjos físicos criados.

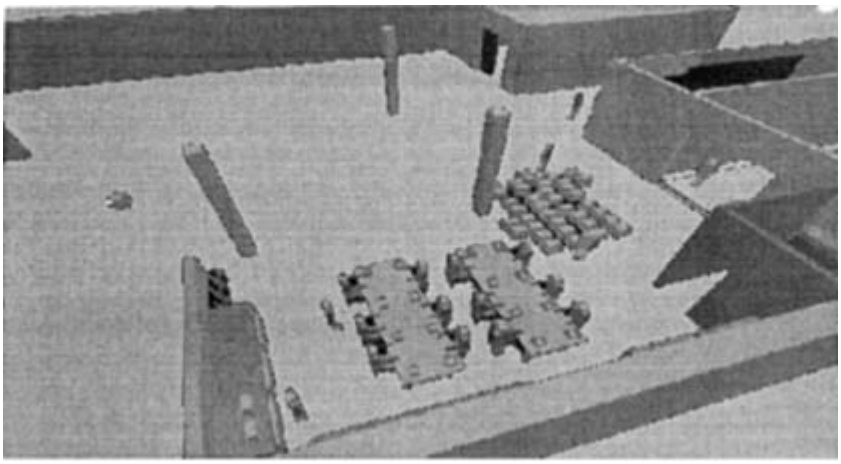


Figura 2-57: Modelo de um arranjo físico modelado em ambiente de realidade virtual (IQBAL & HASHMI, 2001, p. 404).

2.9.1 Realidade aumentada e projeto de instalações

Uma das variantes da realidade virtual é a realidade aumentada (RA). A realidade aumentada difere da realidade virtual na medida em que permite que o usuário ainda possa entrar em contato com o mundo real, isto é, a RA aumenta o nível informacional da realidade através da aplicação de objetos virtuais.

Segundo BRAZ (2005) não há consenso sobre uma definição para realidade aumentada. As aplicações desenvolvidas são bastante diversas formando um *continuum* (***Figura 2-58***) em que as diversas realidades se misturam (AZUMA et al., 2001).

Figura 2-58: *Continuum* das aplicações de realidade virtual (Adaptado de BRAZ, 2005).

As principais características da RA segundo AZUMA et al. (op cit.) são:

a) combina o real e o virtual;

b) é interativa e em tempo real;

c) as imagens reais e virtuais são alinhadas espacialmente e sincronizadas temporalmente num espaço tridimensional.

O uso das técnicas de realidade virtual aumentada certamente tem um papel importante para o projeto de instalações industriais. Vários dos artefatos desenvolvidos historicamente podem ser transferidos para as aplicações computacionais desse tipo. Um exemplo semelhante a isso é a sobreposição ao arranjo físico das linhas de fluxo de materiais entre as áreas de produção, seja em papel ou em *softwares* como o Factory. Essa área ainda se encontra em desenvolvimento mas já apresenta resultados prontamente aplicáveis a sistemas

para projeto de instalações industriais, como a possibilidade de associação de informações diretamente com o arranjo fisico, como o que é mostrado na ***Figura 2-59***. Nesse tipo de aplicação, as informações são exibidas e ocultas dinamicamente à medida que o usuário se desloca pelo modelo virtual e se aproxima dos objetos.

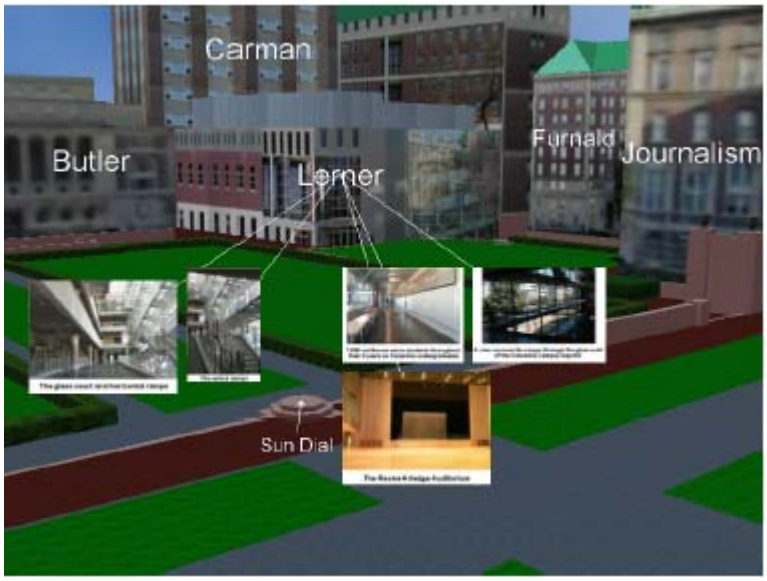


Figura 2-59: Acesso a informações disponibilizadas em ambiente de realidade virtual aumentada (BELL et al., 2001).

Uma outra forma de tentar superar as dificuldades de manipulação de arranjos físicos representados digitalmente foi o sistema baseado no que foi chamado de interfaces naturais, apresentado a seguir.

2.9.2 Interfaces naturais para manipulação de arranjos fisicos

A partir da teoria da regulação da ação desenvolvida por Hacker (1994), FJELD et al. (1999) desenvolveram uma forma de interação entre humanos e computadores com aplicação ao desenvolvimento de arranjo físico que privilegia gestos naturais que dispensam o uso de dispositivos como *mouse* e teclado. A ***Figura 2-60*** mostra o modelo de interação seguido.

A partir da definição de uma tarefa, o usuário pode definir uma meta, planejar as ações que poderão levá-lo a atingi-la, agir e observar os resultados da sua ação e então reiniciar o processo.

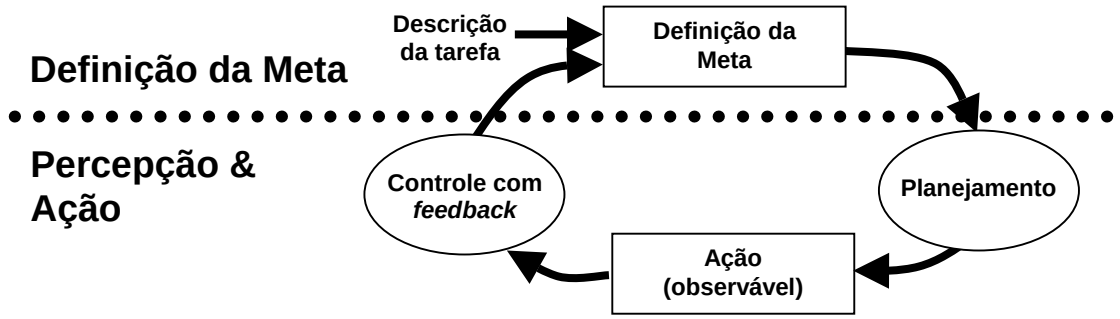


Figura 2-60: Interface com o usuário onde a percepção e a ação coincidem

Quando as ações estão intencionalmente ligadas às metas estabelecidas temos um comportamento chamado de pragmático. Quando as ações têm um caráter meramente exploratório e que podem explicitar algo sobre o problema, temos um comportamento chamado de epistêmico.

Os seis princípios usados para desenvolver o sistema foram:

a) permitir que os usuários possam escolher entre o comportamento epistêmico (exploratório) e o pragmático (orientado a metas);
b) assegurar que os erros tenham pouco impacto de modo que o comportamento epistêmico seja estimulado;
c) permitir uma regulação entre os dois comportamentos citados;
d) permitir que os usuários assumam funções de planejamento de maneira direta e intuitiva;
e) indicar claramente quais objetos e ferramentas são úteis para resolução da tarefa;
f) mostrar claramente os resultados do usuário.

No sistema computacional, chamado de BUILD-IT, a manipulação do arranjo físico e a exibição da sua imagem ocorrem sobre uma mesa, enquanto uma outra vista em perspectiva é exibida em uma tela vertical (***Figura 2-61-a***). A manipulação pode ser feita com uma ou duas mãos (***Figura 2-61-b***), manipulando simultaneamente mais de um dos blocos que representam os equipamentos do arranjo físico.

(a) **(b)**

Figura 2-61: Utilização do sistema BUILD-IT (FJELD et al. , 1999).

A imagem projetada sobre a mesa equivale à tela dos sistemas tradicionais onde as ações de manipulação são mapeadas para o sistema de controle. A tela projetada é mostrada na ***Figura 2-62***. A parte quadriculada que representa o chão-de-fábrica é ladeada por áreas cinzas onde estão depositados os objetos que podem ser posicionados no arranjo fisico. Remover um objeto dessas áreas equivale a acionar um menu nas interfaces tradicionais.

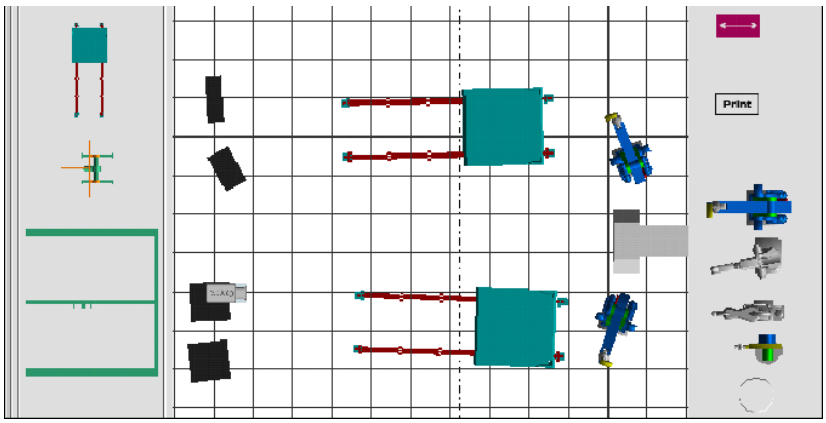


Figura 2-62: Tela de manipulação do arranjo do sistema BUILD-IT (FJELD et al. , 1999).

Por facilitar a interação, os autores afirmam que o sistema facilita a avaliação de arranjos físicos alternativos por equipes. O principal fator para isso é que o espaço de ação -onde estão localizados as mãos e os dedos- ocupam a mesma posição do espaço de percepção que é a posição relativa dos objetos no mundo real. Isso traz maior desempenho do que quando um *mouse* é usado, quando há a separação entre o espaço de ação e o de percepção.

2.10 A importância da escolha da representação para geração de arranjos físicos alternativos

Após ser observada a evolução das representações, percebe-se que a sua adoção está diretamente associada à geração de alternativas de arranjo fisico. Nesse processo de busca, as soluções são continuamente criadas e avaliadas, num ciclo de várias etapas de representação e avaliação. As principais funções desempenhadas pelas representações são: (a) criação de um elemento externo que consiga fixar as idéias que surgem na mente dos envolvidos no processo; (b) servir de elemento de comunicação entre os analistas de projeto que passam a ter uma base objetiva para discussão; (c) fornecer os meios que permitam a modificação do arranjo e (d) servir como documento do processo de projeto. Além disso, com a transposição do arranjo em potencial da mente do analista de arranjo físico para uma representação externa, há a liberação de capacidade mental para a consideração de outras questões de interesse.

Historicamente, a necessidade de poder gerar soluções de arranjo físico a partir de outras existentes fez com que algumas das representações tradicionais fossem desenvolvidas para suportar essa manipulação de arranjos (***Figuras 2-63*** e ***2-64***).

Manipular as áreas para a obtenção de um arranjo físico de blocos satisfatório não significa apenas reposicioná-los um em relação ao outro em um espaço limitado do futuro prédio, significa também modificar a forma dessas áreas, aglutiná-las e separá-las.

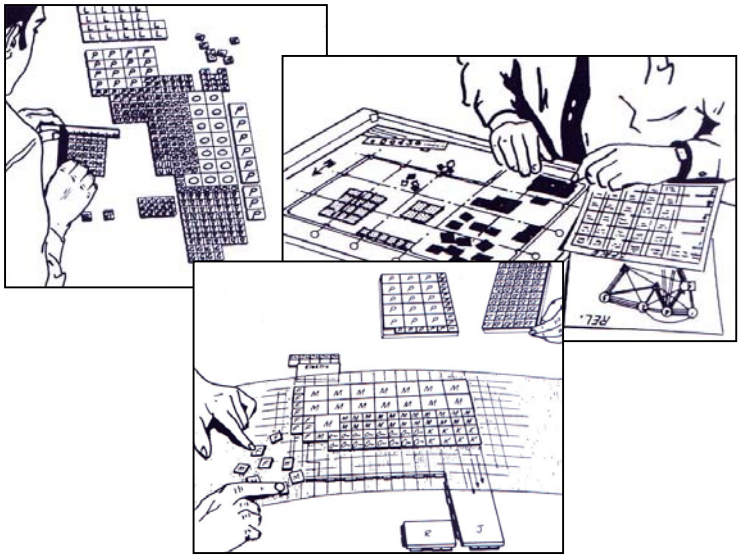


Figura 2-63: Uma forma de representação que permita a alteração dos elementos constituintes é importante (MUTHER, 1977, p. 8-11)

Figura 2-64: Gabaritos tridimensionais para o projeto de arranjos de escritório (TOMPKINS & WHITE, 1984, p. 650).

A ***Figura 2-63*** mostra a manipulação de áreas, divididas em pequenos pedaços de modo a permitir o ajustamento das formas das áreas entre si. Essa mesma idéia foi replicada em alguns *softwares* de arranjo físico de blocos para obtenção de soluções em pouco tempo, como o ALDEP (SEEHOF & EVANS, 1967).

Após a introdução das ferramentas computacionais, as possibilidades de manipulação das soluções de arranjo físico foram diminuídas devido à precariedade das

interfaces de *software* com o usuário. Os primeiros *softwares* permitiam apenas a troca de duas áreas através da especificação dos índices que as designavam. Com o advento da interface gráfica nos sistemas operacionais e o surgimento dos sistemas gráficos em CADD, tornou-se possível manipular de forma mais adequada os arranjos físicos. Apesar disso, o processo de uso continua bastante exigente pois o usuário precisa ler as informações, interpretá-las e traduzir as suas ações de alteração do modelo em ações sobre o *software* que controla o modelo computacional. Os dados, que nos gabaritos tradicionais tinham apenas uma representação gráfica, passaram a constituir dados manipuláveis pelo usuário através do programa.

Em geral, as representações (tanto as de arranjo físico quanto as de análise ergonômica) não são baseadas no conceito de objeto mas são construídas com elementos básicos como linhas, arcos, planos etc. Assim, uma máquina só pode ser percebida pelo usuário do sistema, não possuindo internamente ao programa uma existência estruturada como um único objeto. A existência estruturada no programa permite: a) uma manipulação mais simplificada por parte do usuário, b) a possibilidade de encapsular dados que expandam a representação do objeto, c) um aumento da significação do mesmo para aqueles que o manipulem através do programa.

Apesar dessas limitações, as novas tecnologias de realidade virtual, especialmente a realidade aumentada, permitem implementar nas representações computacionais os meios de manipulação usados desde há muito tempo: a manipulação epistêmica na busca por soluções. O estudo e a interpretação da própria representação propiciam a descoberta (entendida como construção mental) de relações e possibilidades que auxiliam o analista a atingir seus objetivos analíticos, o que, de outra forma, seria mais difícil.

Quanto à avaliação das alternativas geradas, ela ocorre de modo contínuo à medida que as modificações da solução corrente são testadas. Na maioria das representações

apresentadas, a avaliação é predominantemente qualitativa, baseada principalmente na aparência do arranjo físico. Como o meio de geração das soluções é icônico e os valores de avaliação tradicionalmente usados na engenharia são matemáticos, o arranjo físico deve ser traduzido (modelado) nessas outras representações de modo que as avaliações possam ser realizadas. Um exemplo dessa abordagem é a geração das linhas de fluxo no Factory.

A possibilidade de uma maior convergência entre esses tipos de modelos pode oferecer ganhos significativos como a consideração simultânea de critérios qualitativos e quantitativos em um mesmo modelo. Essas tecnologias permitem apontar para um modelo de interação com o modelo do arranjo físico e com a própria instalação industrial com as seguintes características:

a) os objetos reais do arranjo físico devem ser representados, pelo menos parcialmente, por objetos virtuais;
b) os objetos devem funcionar como as interfaces de acesso às informação que encapsulam, i.e., cada objeto guarda as informações que lhe são pertinentes;
c) parte das informações críticas, i.e., de especial interesse para o usuário, devem estar prontamente disponíveis à medida que se interage com o modelo;
d) os modelos devem mesclar representações icônicas e dados para permitir uma identificação rápida de ações a serem tomadas;
e) permitir a manipulação fácil de valor quantitativos e qualitativos.

Nos próximos capítulos serão examinados os modelos quantitativos usados para avaliar soluções de arranjo físico, como eles podem ser incorporados aos modelos icônicos e como são usados no processo de projeto.

3 MODELOS SIMBÓLICOS E AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE ARRANJO FÍSICO

Neste capítulo são apresentadas as características dos modelos matemáticos computacionais usados para avaliação de alternativas de arranjo físico. Modelos e métodos se confundem uma vez que os métodos utilizam formulações matemáticas para quantificação do valor relativo das alternativas. No final do capítulo são apresentadas as características desejáveis dos programas computacionais para projeto de arranjo físico.

3.1 Métodos de avaliação de desempenho de arranjo físico

Os métodos de avaliação de arranjos físicos se baseiam na obtenção de soluções consideradas adequadas sob algum tipo de critério objetivo, seja quantitativo ou qualitativo. Essa comparação pode ser de forma integral entre duas alternativas detalhadas ou entre duas alternativas simplificadas (arranjo físico de blocos). Pode ocorrer também de forma seqüencial, à medida que se desenvolve o estudo.

A necessidade de critérios objetivos para comparação entre alternativas é antiga, seja para satisfazer a criação de uma proposta econômica-financeira para implantação da alternativa, seja para conseguir estimular o consenso dos profissionais envolvidos. Além disso, as características específicas de cada instalação industrial impedem que sejam adotados critérios com validade geral.

J. M. MOORE (1962) e MUTHER (1976) apresentam algumas formas sistemáticas de avaliar alternativas de arranjo físico:

1. *Planta piloto* – Alternativa cara, usada em geral por indústrias de processo contínuo. Apresenta todos os pontos negativos de um modelo físico com baixa flexibilidade, como não poder ser reaproveitada e possuir um desenvolvimento demorado;

2. *Comparação de custos* – Considerar todos os gastos e custos operacionais e o retorno sobre o investimento. J. L. OLIVÉRIO (1985) lista alguns dos custos que podem estar envolvidos: custo de transporte interno, custo financeiro do material em processo, custo do controle de qualidade, custo da supervisão, custo do controle da produção, custo da depreciação do edifício e custo de investimento necessário em cada um dos arranjos fisicos. O maior fator contrário a esse critério é apresentado por SLACK et al. (1997) que afirmam que "... na prática a incerteza sobre os custos fixos e variáveis de cada tipo de arranjo físico significa que raramente a decisão pode basear-se exclusivamente na consideração do custo ...".

3. *Avaliação de produtividade* – Desenvolve-se algum índice como homens-horas por produto. O ponto negativo desse tipo de critério é a desconsideração da diferença entre os capitais investidos;

4. *Avaliação do espaço* – Através da área efetivamente ocupada em relação à área total. Deve-se prestar atenção à ocupação do espaço tridimensional observando fatores como, por exemplo, a altura de empilhamento de materiais;

5. *Comparação de linearidade de fluxo* – Alternativas que possuam fluxos que se cruzam em demasia ou que retornem são consideradas inferiores em qualidade pois os fluxos são na verdade pessoas, equipamentos e informações em movimentos pelos centros produtivos da planta;

6. *Análise de fatores* – Os fatores importantes são classificados por ordem de importância e avaliados para cada alternativa. Através da comparação entre esses

fatores, quantitativos ou qualitativos, seleciona-se uma das alternativas como a melhor;

7. *Classificação de fatores* – As alternativas são ordenadas de forma decrescente para cada um dos fatores considerados. A melhor recebe o número 1 e as demais recebem um número maior;
8. *Prós e contras* – Simplesmente listando paralelamente os pontos a favor e contra de cada uma das alternativas.

Além desses métodos, a simulação de sistemas (BANKS, 1998) assume um papel de destaque na avaliação de alternativas de arranjo físico pois pode considerar diversos aspectos de uma solução de arranjo físico sujeitos às variações aleatórias dos sistemas reais. Dada sua importância, essa técnica será abordada em mais detalhes na seção 3.2.

A partir do estabelecimento dessas formas de avaliação elas podem ser implementadas computacionalmente usando técnicas como programação linear e outras soluções matemáticas. No entanto, há a necessidade de se estabelecer o consenso sobre qual forma é a mais adequada e como seus resultados serão avaliados. A obtenção dos arranjos através dessas técnicas depende de três tipos de informações:

a) as **informações numéricas ou quantitativas** como o espaço necessário ocupado por uma área de atividade e a intensidade de fluxo entre as áreas;

b) as **informações lógicas ou qualitativas** como as preferências do projetista e dos usuários e as relações de proximidade;

c) as **informações gráficas** como o desenho de um arranjo físico existente.

O foco principal das ferramentas de arranjo físico auxiliado por computador é a representação e a manipulação desses três tipos de informações para a obtenção de uma solução factível, cada qual com suas características.

A grande maioria de métodos computacionais utiliza as informações da Carta de Relações Preferenciais (***Figura 2-26***) e da Carta De-Para (***Figura 2-29***), ou seja, informações de proximidade e de intensidade de fluxo entre as áreas de atividade. Mesmo métodos mais recentes, como os que usam tecnologias como redes neurais, utilizam essas informações.

FRANCIS & WHITE (1974) apresentam um volume com uma série de modelos matemáticos para analisar alternativas de arranjo físico e localização de instalações. Principalmente a partir da década de 1970, vários algoritmos foram desenvolvidos para tratar esses problemas. Os ***Quadros de 3 a 8*** apresentam uma lista desses programas computacionais e algoritmos.

Nome	Descrição	Referências
QAP (Problema de designação quadrática) e métodos exatos	Métodos otimizantes	KOOPMANS & BECKMAN (1957); BAZARAA (1975); HASSAN *apud* SULE (1992); FOULDS (1983); SAHNI & GONZALES (1976)
TESSA	Grafos baseados em relações de adjacência	BOSWELL (1992)
CORELAP *(Computerized Relationship Layout Planning*); **CORELAP 8; Interactive CORELAP**	Utiliza as relações qualitativas da Carta de Relações Preferenciais	LEE & MOORE (1967); SEPONNEN (1969); MOORE (1971)
ALDEP (*Automated Layout Design Program*)	Construtivo e qualitativo, visa minimizar a distância entre departamentos	SEEHOF & EVANS (1967)
DA *(Deltahedron Approach)*	Utiliza um grafo com forma de deltaedro planar	WATSON et al. (1995)

QUADRO 3: Métodos exatos e heurísticas baseadas em relações de adjacência (continua).

Nome	Descrição	Referências
SPIRAL	Utiliza uma estrutura de grafos formando um retículo triangular	GOETSCHALCKX (1992)
MATCH	Utiliza teoria dos grafos e programação inteira	MONTREUIL et al. (1987)

QUADRO 3: Métodos exatos e heurísticas baseadas em relações de adjacência (continuação).

Nome	Descrição	Referências
CRAFT (*Computerized Relative Allocation of Facilities Technique*); ***CRAFT-M, SPACECRAFT***	Melhoramento de uma solução inicial através da troca de posições entre pares de departamentos que tenham a mesma área ou sejam vizinhos entre si	BUFFA *et al*. (1964); HICKS e COWEN (1976); JOHNSON (1982)
HILLIER	Divisão da área total em uma grade homogênea	HILLIER & CONNORS (1966)
PLANET *(Plant Layout Analysis and Evaluation Technique)*	Usa dados de fluxo da carta De-Para	APPLE & DEISENROTH (1972)
MAT *(Modular Allocation Technique*)	Minimização da soma de produtos de dois conjuntos de números ordenados em ordem crescente e decrescente	EDWARDS et al. (1970)
VOLLMANN, NUGENT & ZARTLER	Similar à CRAFT	FRANCIS & WHITE (1974)
COFAD (*Computerized Facilities Design*); ***COSFAD; COFAD-F***	Integra a CRAFT com a seleção de equipamentos de manuseio de materiais	MOORE (1974); WEBSTER & REED (1971); SHORE & TOMPKINS (1980)
SHAPE	O posicionamento de um departamento em relação ao outro depende do valor da função objetivo (reduzir distâncias) para as quatro posições possíveis (acima, abaixo, à esquerda e à direita)	HASSAN et al. (1986)
DAP *(Distance Assignment Problem)*	Abordagem híbrida que busca alocar distâncias a pares de departamentos a um custo mínimo	ROSENBLATT & GOLANY (1992)

QUADRO 4: Procedimentos baseados em distância ou custos.

Nome	Descrição	Referências
NLT (*Nonlinear optimization Layout Technique*)	Utiliza programação não-linear. Permite que os departamentos tenham qualquer área e que possam ser colocados em qualquer posição	CAMP et al. (1992)
Problema do arranjo físico dinâmico *(Dynamic Facilities Layout Planning)*	Baseia-se na solução de QAPs sucessivos em um modelo de programação dinâmica considerando o custo de materiais	ROSENBLATT (1986); URBAN (1992); BALAKRISHNAN et al. (1992)

QUADRO 4: Procedimentos baseados em distância ou custos (continuação).

Nome	Descrição	Referências
QAP via Simulated Annealing	Resolução do problema de designação quadrática através da heurística *Simulated Annealing*	BURKARD (1984); BURKARD & RENDL (1984); WILHELM & WARD (1987); HERAGU & ALFA (1992); HERAGU (1992)
Simulated Annealing I	Arranjos híbridos de estações de trabalho e células de manufatura via *Simulated Annealing*	HARHALAKIS et al. (1996)
Simulated Annealing II	Minimizar a distância total percorrida no manuseio de materiais no chão-de-fábrica de sistemas de manufatura celular, tanto internamente quanto externamente à célula, simultaneamente	WANG et al. (1998)
Simulated Annealing III	Consideração de restrições de zoneamento usando *simulated annealing*	KOUVELIS et al. (1992)
Algoritmos Genéticos	Resolve simultaneamente o arranjo de máquinas e a forma do fluxo de materiais	MAK et al. (1998)
HOPE *(Heuristically Operated Placement Evolution)*	Ocorre a divisão da área de cada departamento em unidades e a utilização de uma *Space Filling Curve*	KOCHHAR et al. (1998)

QUADRO 5: Procedimentos baseados em distância ou custos com *simulated annealing* e algoritmos genéticos.

Nome	Descrição	Referências
-	Determinação da quantidade de veículos para transportar materiais em uma rede de fluxos	MAXWELL & MUCKSTADT (1982)
-	Consideração do comportamento dinâmico no tempo para sistemas fixos de manuseio de materiais	MAXWELL & WILSON (1981)
-	Métodos baseados em grafos para otimizar a distância percorrida por AGVs (veículos guiados automaticamente) considerando variáveis discretas.	GASKINS & TANCHOCO (1987); EGBELU & TANCHOCO (1986)
-	Uso de programação inteira para otimizar o projeto de caminhos de AGVs em uma rede de fluxos	GASKINS et al. (1989)
-	Minimização da distância total de uma rede de passagens com a possibilidade dos custos variarem de forma não-linear com a distância	CHHAJED et al. (1992)
-	Solução composta por uma solução polinomial gera-se uma rede de fluxos “ótima”	MONTREUIL & RATLIFF apud CHHAJED (1992); MONTREUIL apud CHHAJED (1992)
AISLES	Considera simultaneamente o estabelecimento do ponto de conexão do fluxo com a área, seu custo de implantação e custo de manuseio de vários equipamentos. Gera um problema de programação inteira mista.	GOETSCHALCKX & PALLIYIL (1994)

QUADRO 6: Procedimentos que consideram o caminho dos fluxos.

Nome	Descrição	Referência
Análise de Multiatributos	Utilização da teoria do valor de multiatributos como forma de determinar a proximidade entre as áreas de atividade durante a determinação do arranjo.	SARIN et al. (1992)
Arranjo físico de FMS e células de manufatura	Modificação do QAP para que possa tratar problemas de arranjo físico de duas configurações de FMS	KAKU & RACHAMADUGU (1992), HERAGU & KUSIAK (1988), AFENKATIS (1989), KOUVELIS & KIRAN (1990) e LEUNG (1992)

QUADRO 7: Outros procedimentos (continua).

Nome	Descrição	Referência
Inteligência Artificial	Utilização de regras lingüísticas e lógica nebulosa, redes neurais	CHUNG (1999); BADIRU & ARIF (1996); BABU & YAO (1996); WELGAMA et al. (1994), SIRINAOVAKUL & THAJCHAYAPONG (1994), ABDOU & DUTTA (1990), ARINZE et al. (1989) e KUMARA et al. (1989).
SLP (Systematic Layout Planning) e AHP (Analitic Hierarchic Process)	Usar o sistema SLP como estrutura para desenvolvimento do arranjo incorporando as escalas verbais da AHP para expressar as preferências dos decisores	YANG et al. (2000)
Programação Multiobjetivos	Consideração tanto de critérios quantitativos quanto de qualitativos	DUTTA & SAHU (1982); ROSENBLATT (1979)
Problema do Arranjo Físico com Vários Andares	Resolução através de uma heurística que considera a utilização de elevadores	MATSUZAKI et al. (1999)
Análise de agrupamentos	Determinação do arranjo a partir da identificação de agrupamentos de áreas	SCRIABIN et al. (1985)
CADD e Algoritmos Genéticos	Realizar o planejamento do arranjo físico do canteiro de obras de um projeto de construção civil de 4 fases	OSMAN (2002)
LAYSPLIT	Gera arranjos físicos de blocos que minimizem os custos de manuseio de materiais através da divisão (*splitting*) das áreas	GOPALAKRISHNAN et al. (2003)

QUADRO 7: Outros procedimentos (continuação).

Nome	Descrição	Referências
BLOCPLAN	Otimiza o arranjo através da troca dos departamentos entre si	DONAGHEY (1986)
LayOPT & MULTIPLE	Utiliza troca de departamentos e redefinição da forma das áreas	BOZER et al. (1994); GRAJO & BOZER (1997)

QUADRO 8: Métodos presentes em programas computacionais de arranjo físico

Nome	Descrição	Referências
Layout Manager	Vários algoritmos desenvolvidos por Foulds e colegas	FOULDS (1997); HASSAN et al., 1987; FOULDS et al., 1985; FOULDS & GIFFIN, 1985; WATSON et al., 1995).
CRIMFLO	Cálculo do fluxo de materiais entre os departamentos	CRIMBO (2001)
MATFLOW	Cálculo do fluxo de materiais entre os departamentos e troca dos departamentos	MARKT et al. (1997)
Factory	*Software* composto por funções de cálculo de fluxo, algoritmos de otimização dos arranjos (como a SPIRAL) e rotinas de auxílio ao desenho	TORRES (1998); GOETSCHALCKX (1992); CIMTECHNOLOGIES (1995)

QUADRO 8: Métodos presentes em programas computacionais de arranjo físico .

Vários dos métodos apresentados nos quadros anteriores apresentam características já criticadas na década de 1960 por VOLLMAN & BUFFA (1966). Esses autores criticaram os modelos de avaliação, pois esses consideravam que:

a) os dados de custo e de fluxo sempre existiam;

b) os custos de transportes eram lineares, incrementais e passíveis de atribuição a atividades específicas;

c) o custo de manuseio de materiais era o único fator significante;

d) os dados de fluxo eram determinísticos, ou seja, desconsideravam variações e aleatoriedade;

e) o problema de localização das instalações e outros problemas do sistema não tinham nenhuma relação entre si.

A solução desses problemas passa pela necessidade de uma forma flexível de modelagem. Além da análise de cenários alternativos é necessário que o *software* permita que

os arranjos físicos tenham seu modelo de avaliação (constantes, formulas, bases de dados, entre outros) alterado de acordo com as necessidades do projetista, de acordo com as informações disponíveis e que considere a aleatoriedade dos processos. A simulação de sistemas tem sido usada exatamente para suprir essas falhas dos métodos tradicionais de avaliação de arranjos físicos.

3.2 Simulação

3.2.1 Definição e metodologia

Simulação faz parte do conjunto de técnicas da Pesquisa Operacional (PO) usadas para resolver problemas complexos e que utiliza uma abordagem estruturada e precisa.

Existem várias definições para simulação que diferem principalmente quanto à sua abrangência. COSTA (2004, p. 12):

> "*é o processo de* modelagem de um sistema real e a experimentação no mesmo. Os resultados das experimentações, após análises, apresentam uma visão futura do sistema. As informações geradas auxiliam nas tomadas de decisão, necessárias no momento presente, e contribuem para uma melhor compreensão do sistema estudado".

Posto de outra forma, simulação é a imitação da operação de um processo ou sistema real no tempo e envolve a geração de um histórico artificial de dados. A observação desse histórico permite que se façam inferências a respeito das características operacionais dos elementos reais que estão sendo representados e de como interagem.

A simulação começou a ser usada na década de 1950 na indústria aeroespacial dos EUA e, graças ao desenvolvimento da tecnologia de computadores, tem hoje uma série de ferramentas computacionais para desenvolvimento.

Um dos principais argumentos para sua utilização é a de que a simulação ganha cada vez mais importância em decorrência do aumento da complexidade dos sistemas produtivos para fazer frente a mercados cada vez mais exigentes e instáveis. A possibilidade

de modelar com sucesso esses sistemas em vários níveis de detalhe e de forma dinâmica faz com que seja aplicada a vários tipos de sistemas produtivos.

O processo de análise de sistemas reais através de modelos baseia-se na metodologia da simulação, sendo a modelagem o seu cerne. Paralelamente a essa capacidade de desenvolver modelos, a prática de simulação requer também capacidades de gerenciamento de projeto e de organização de trabalho assim como de interação com pessoas de várias áreas de atuação.

Para modelar o mundo real é utilizada uma visão parcial, até mesmo simplificada, de parte desse mundo. Nesta visão são organizados objetos que interagem entre si para atingir os objetivos da modelagem (BANKS & CARSON, 1984). Os elementos e relações observados no mundo real compõem o que se convencionou chamar de sistema real, imerso no seu ambiente. O resultado desse processo de abstração do sistema real é geralmente uma representação estruturada chamada de modelo.

As etapas do processo de simulação (“metodologia de simulação”) e que constituem as atividades mais comuns do especialista em simulação ou que exigem o seu concurso são:

1. **Formulação do problema** – Inicia-se com a declaração do problema de forma clara, de modo que todos possam entender as implicações dessa declaração. Essa formulação servirá de ponto de partida mas poderá ser atualizada quando se souber mais a respeito do sistema.

2. **Determinação dos objetivos e plano geral do projeto** – O sucesso do processo se inicia pelo estabelecimento e registro das questões que serão respondidas pelo modelo. Também deve haver um questionamento sobre se a simulação é realmente a metodologia adequada para auxiliar a

responder essas questões. Também devem ser especificados os cenários a serem considerados e quais critérios serão utilizados para avaliar cada um deles. As necessidades de dados e as hipóteses consideradas também devem ser levantadas;

3. **Desenvolvimento do conceito do modelo** – Esta é uma das etapas mais difíceis do processo e uma das que exige mais experiência prática. Nesta fase é desenvolvido o conceito geral do modelo, geralmente partindo-se de um modelo mais simples ao qual vão sendo acrescentados os detalhes até que sejam obtidos subsídios suficientes para responder às questões propostas inicialmente. Como o modelo é construído visando responder essas questões é necessário o envolvimento do usuário do modelo para capturar as suas expectativas com relação ao tipo de resposta esperada;

4. **Coleta de dados** – Esta etapa pode ser bastante complexa e exige bastante tempo, pois, em geral, as informações necessárias se encontram dispersas, sumariadas em excesso ou simplesmente não existem. Às vezes, as informações existem mas o usuário do modelo desconhece a sua existência. Também se deve evitar a coleta dados desnecessários, o que reduz o tempo disponível para as outras atividades;

5. **Codificação** – Nesta fase o modelo conceitual deve ser recriado em uma linguagem de programação genérica (por exemplo, Pascal ou C++), em uma linguagem de simulação (por exemplo, GPSS/H ou SIMAN) ou em um simulador (por exemplo, Arena, AutoMod ou Promodel). Esta etapa depende da experiência do modelador em traduzir o modelo conceitual em um modelo computadorizado;

6. **Verificação do modelo** – Consiste na comparação do modelo computadorizado com o modelo conceitual para se determinar se o que foi programado corresponde ao que foi planejado. BANKS & NORMAN (1996) sugerem que sejam usados os princípios de engenharia de software como: a) desenvolvimento modular, b) criação de verificações internas ao modelo, c) teste com valores aleatórios, d) criação de comentários dentro do modelo, e) acompanhamento do programa passo a passo e f)utilização de animação, se possível;

7. **Validação do modelo** – Nesta etapa, depois de verificado o modelo, pretende-se verificar se o modelo representa de fato o sistema real. Entre os testes sugeridos por BANKS & NORMAN (op. cit.) estão testes de degeneração (para taxas de chegada altas), validação da aparência (observando-se se os valores de saída fazem sentido), comparação das saídas com dados históricos e a análise de sensibilidade (observando se os resultados estão apontando as tendências esperadas);

8. **Planejamento de experimentos** – Determinação do período de inicialização (*warmup*), duração dos tamanhos das simulações e do número de replicações;

9. **Simulações e análise de produção** – Para levantar medidas de desempenho, determinação dos intervalos de confiança e dos experimentos planejados;

10. **Mais simulações** – para determinação da precisão estatística desejada;

11. **Documentação e criação de relatórios** – Nessa fase é feita a documentação do modelo para evitar perda de informações quando o

modelo tiver que ser estudado ou modificado posteriormente por analistas. Também devem ser gerados relatórios das atividades desenvolvidas, documentando datas, eventos e decisões tomadas. Sugere-se que isso seja feito periodicamente para manter o demandante do projeto a par dos progressos feitos;

12. **Implementação do modelo** – O analista deve assumir um comportamento o mais imparcial possível frente aos resultados encontrados e às soluções apresentadas.

O processo de desenvolvimento de um estudo de simulação não está livre de erros, problemas e contratempos. O. M. ULGEN et al. (1996) reforçam a necessidade de uma metodologia robusta para que se tenha sucesso no uso de simulação. Como fatores de fracasso apontam como falhas do processo em si: (a) a falha ao não saber apresentar os casos de sucesso de outros projetos; (b) as mudanças freqüentes do escopo do projeto; (c) a falta de revisão do modelo enquanto o estudo avança e (d) não saber quando parar o estudo. Quanto ao modelo, acrescentam que ele pode ser usado menos do que deveria e as pessoas podem não entender os limites dele. Quanto ao elemento humano: (a) há a necessidade de trabalho em equipe, (b) deve ser vencida a incapacidade de ouvir e entender o cliente e (c) devem ser fornecidas muitas alternativas para o problema.

No Brasil, a atuação dos profissionais de simulação se dá basicamente de duas formas: (a) internamente à empresa à qual pertencem, constituindo um departamento de análise de processos ou de informática e (b) através de empresas de consultoria, prestadoras de serviço. Os atores envolvidos em um estudo de simulação são pessoas das mais variadas formações, experiências e esferas de poder e, em geral, são formadas equipes com analistas de simulação e elementos *design*ados pela empresa. A formação desses profissionais é variada: engenheiros mecânicos, de produção, de computação e outras.

3.2.2 Aplicação dos Modelos de Simulação

Os modelos de simulação são aplicados atualmente em vários setores. Entre as áreas de aplicação destacam-se: manufatura e manuseio de materiais, sistemas públicos de saúde, sistemas militares, recursos naturais, serviços públicos, transporte, sistemas computacionais e sistemas de comunicação (BANKS, 1998).

A construção do modelo visa disponibilizar uma ferramenta capaz de substituir o sistema real em uma série de análises a serem realizadas, com o objetivo ulterior de "otimizar" o sistema real. As principais funções dessas ferramentas são:

(a) prever o comportamento conjunto dos elementos modelados;

(b) entender, através da construção do modelo, como os componentes dele interagem e quais são os resultados advindos disso;

(c) avaliar o desempenho do sistema real e das possíveis modificações feitas nele;

(d) prescrever (justificar) as modificações a serem feitas (consolidadas) no sistema atual segundo critérios objetivos;

(e) modificar o sistema real que, através das análises, terá sua forma modificada ou determinada.

O nível de análise dos modelos se dá, em geral, no nível da unidade industrial e no nível do funcionamento das subunidades (células) e não no nível das atividades desenvolvidas pelos operadores dos equipamentos. São simulados as ações do operador e os efeitos delas sobre os equipamentos, cargas e dispositivos e não os efeitos sobre o próprio operador.

3.2.3 Uso de Simulação para avaliação de arranjos físicos

Já na década de 1970 J. M. Apple advogava o uso da teoria das filas e da simulação de Monte Carlo “em papel ou em computador” (APPLE, 1977, p. 192) como forma de avaliar soluções alternativas e que considerem a aleatoriedade “que tem um papel importante na indústria, na natureza de rejeitos, quebras e assim por diante” (APPLE, op. cit. p. 192). Apesar de muitos simuladores hoje em dia possuírem representações icônicas, os resultados matemáticos gerados pelos simuladores os classificam como ferramentas de análise quantitativa para arranjo físico.

Segundo TAM & LI (1991), as heurísticas de arranjo físico estão longe de considerar em detalhes as restrições encontradas no dia-a-dia das instalações industriais. O uso da simulação pode compensar isso, uma vez que os programas de simulação estão bem avançados e permitem a análise de instalações industriais em detalhes e de forma simultânea.

ALEISA & LIN (2005) afirmam que os estudos de simulação são usados para estimar os parâmetros do sistema associados com as seguintes tarefas:

a) desenvolver arranjos físicos melhores a partir de arranjos gerados pelos algoritmos tradicionais;

b) comparar arranjos em termos de parâmetros operacionais como utilização de recursos, tempo de fluxo e tamanho dos estoques intermediários;

c) avaliar diferentes estratégias para o arranjo, como a adoção da tecnologia de grupo e sistemas de manufatura flexíveis (FMS);

d) identificar problemas de gargalos nos arranjos físicos propostos antes de sua implementação;

e) analisar mudanças na gama de produtos, nas quebras ou nas emergências;

f) incorporar comportamento estocástico e incerteza na demanda;

g) gerar volumes de fluxo aleatórios para considerar nas rotinas tradicionais.

Ainda segundo ALEISA & LIN (op. cit.) existem duas estratégias utilizadas nas aplicações encontradas na literatura sobre o tema:

(a) fazer o arranjo físico e depois simular;

(b) simular e depois fazer o arranjo.

O **QUADRO 9** compara essas duas formas de uso.

Paradigma	**Arranjar e então Simular**	**Simular e então Arranjar**
Crenças	A análise de simulação é local enquanto a de *arranjo físico* é global	Simular antes produz arranjos que são eficientes e realistas
Benefícios	Eficiente em tempo	Fornece estimativas precisas do fluxo para a otimização do *arranjo físico*
Indicada para	• Melhorar um arranjo existente • Remover congestionamentos e gargalos do arranjo • Poucos ajustes nos parâmetros do processo do sistema • O tipo de tecnologia escolhida requer arranjo físico especial ou verificação • Comportamento estocástico/ Variabilidade é insignificante • Foco na minimização da distância percorrida	• Criar um novo arranjo físico para um sistema que apresenta demanda ou comportamento aleatório • Criar um novo arranjo físico para um sistema que apresenta interações complexas • As principais políticas operacionais ou tecnologias não são predeterminadas ou precisam ser justificadas • A simulação é usada para gerar valores aleatórios de fluxo para serem usados nos algoritmos tradicionais • Remover os congestionamentos e gargalos tem maior prioridade do que minimizar a distância
Conclusão	Indicado para políticas operacionais e estratégias de produção predefinidas e que estão focadas na minimização da distância percorrida e custo de manuseio de materiais	Indicado para casos com incertezas e onde os objetivos são a justificação da estratégia de produção e melhorar os parâmetros operacionais do arranjo físico

QUADRO 9: Comparação das duas formas de uso conjunto das rotinas tradicionais de arranjo físico e Simulação (Adaptado de ALEISA & LIN , op. cit.) (continua).

A experiência do autor em projetos de instalações industriais tem mostrado que essas duas situações são extremas e que é verificada a existência de um ciclo de atividades de arranjo físico e de análise com simulação. Dois exemplos disso são: a) Em alguns casos, resolver problemas operacionais causados pelo arranjo físico significa alterá-lo, o que implica em considerar alterações de processo e até de estratégias; e b) Dado que um novo processo deva ser criado, simulá-lo sem um arranjo físico determinado, por exemplo, considerando apenas o seu balanço de massa, pode levar a soluções melhores.

3.2.3.1 Uso de simuladores para representar arranjos físicos

Nesta seção, serão apresentadas as possibilidades e as limitações de técnicas de simulação para representar arranjos físicos e sua manipulação.

3.2.3.1.1 Simuladores de Eventos Discretos

Os principais programas computacionais de simulação disponíveis atualmente utilizam formas de representação que não são totalmente adequadas para representar os elementos envolvidos no arranjo físico como, por exemplo, áreas de atividade e relações qualitativas.

O **primeiro tipo de limitação** é a incapacidade de representar o arranjo físico de forma adequada e ao mesmo permitir a sua manipulação de forma simples. Por exemplo,

a) o programa Automod (BROOKS, 2006) utiliza uma representação gráfica tridimensional com alto grau de precisão (***Figura 3-1***) mas que impede a modificação do arranjo físico no próprio *software* de forma direta. É preciso realizar uma série de operações no programa, como a passagem do modo de simulação para o modo de edição, para alterar o arranjo físico modelado no simulador.

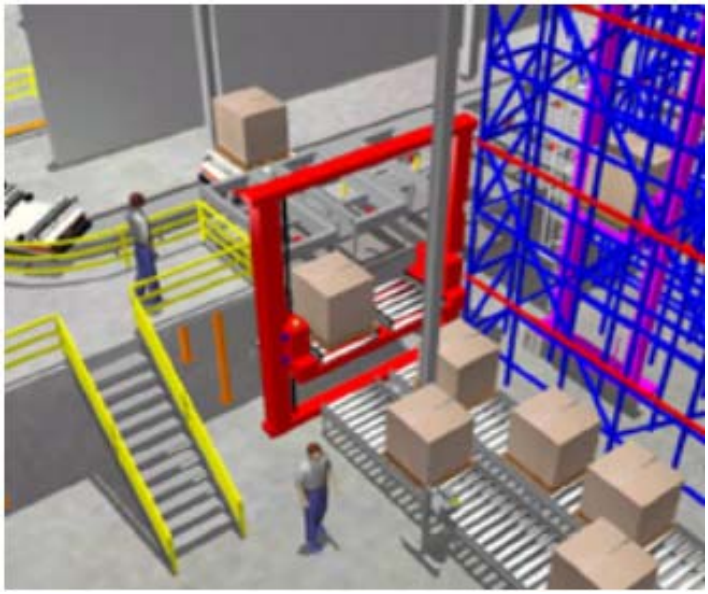


Figura 3-1: Modelo de simulação feito no Automod (BROOKS, 2006.)

b) programas como Arena (ARENA, 2005) e Promodel (PROMODEL, 2003) não possuem uma representação gráfica precisa. São utilizados ícones (***Figuras 3-2*** e ***3-3***) apenas para animação. A manipulação de um arranjo físico no *software* é impossível, isto é, alterar a animação do modelo não tem nenhum efeito sobre os cálculos de desempenho. Além disso, as distâncias decorrentes de alterações do arranjo devem ser convertidas em tempo antes de serem introduzidas no programa.

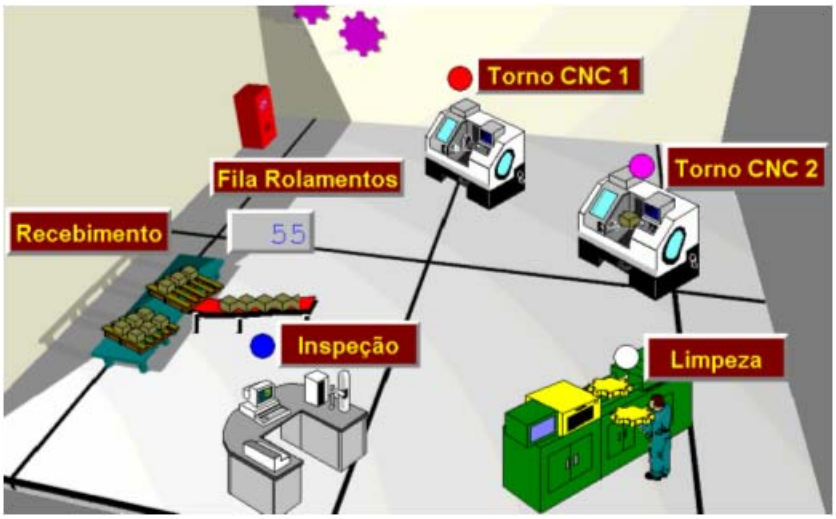


Figura 3-2: Representação gráfica típica do Promodel.

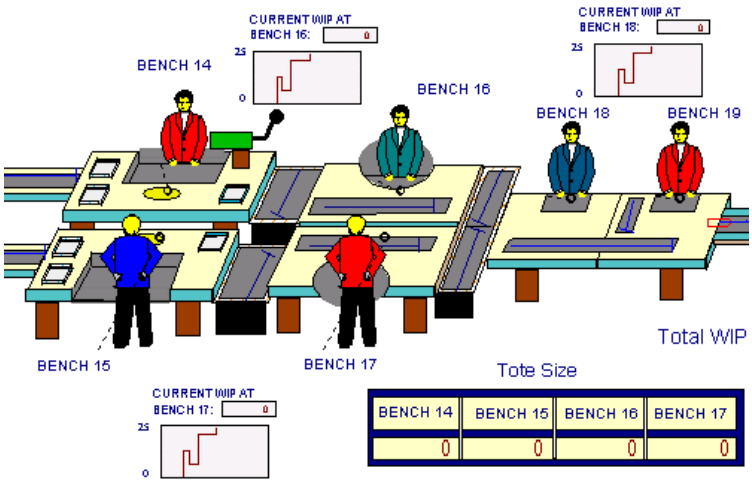


Figura 3-3: Representação gráfica do Arena.

O **segundo tipo de limitação** é a impossibilidade do estabelecimento de relações genéricas no *software* e a sua manipulação como, por exemplo, aquelas da Carta de Relações Preferenciais (***Figura 2-26***). Os construtos existentes permitem basicamente apenas relações de precedência para o estabelecimento da lógica de processos.

O **terceiro tipo de limitação** se refere à inexistência de elementos que representem as áreas e suas propriedades, que poderiam ser indicadas através de atributos. Os programas de simulação permitem que se criem atributos apenas para as entidades do modelo (que representam pessoas, cargas, produtos, entre outros) e em alguns casos para os recursos representativos dos equipamentos e máquinas.

O **quarto tipo de limitação** é a falta de flexibilidade desses programas que permitem apenas a construção de modelos com os recursos programados pelo fabricante. Isso dificulta a construção de métricas de desempenho dos arranjos nos simuladores. Apesar disso, a lógica que pode ser implementada nos simuladores permite a inclusão no modelo de capacidades como escolhas baseadas em probabilidade, escolhas baseadas em valores de variáveis do modelo, além daquelas oportunidades de uso apontadas no **QUADRO 9**. Esse tipo de representação traz em si a capacidade de representar seqüências detalhadas de processo assim como a ocorrência de fluxos intermitentes ou contínuos ao longo do tempo. As

Figura 3-4 e ***Figura 3-5*** exemplificam, respectivamente, a estipulação da lógica de processo no AutoMod e no Arena. No exemplo, simula-se a quebra de uma máquina que ocorre a cada 200 min e que demora 40 min para ser consertada. Para isso, o recurso *Máquina* é desativado, seu estado é alterado para Quebrada, espera-se pelo tempo do reparo e então o recurso *Máquina* é reativado.

```
begin P_Quebra arriving
  /* Simula a quebra da máquina, desativando-a pelo tempo
     equivalente ao tempo de quebra
  */
  while 1=1 do
    begin
      wait for 200 min                /* Espere por 200 min */
      take down R_Maq                 /* Desative o recurso */
      set R_Maq active state to Quebrada  /* Estado de quebrada*/
      wait for 40 min                 /* Espere pelo tempo de quebra */
      bring up R_Maq                  /* Reative a máquina*/
    end
end
```

Figura 3-4: Exemplo de ações que podem ser efetuadas no simulador Automod.

No caso do Arena, os parâmetros de configuração dos comandos estão ocultos no interior dos blocos. Com um duplo clique sobre eles tem-se acesso a esses parâmetros.

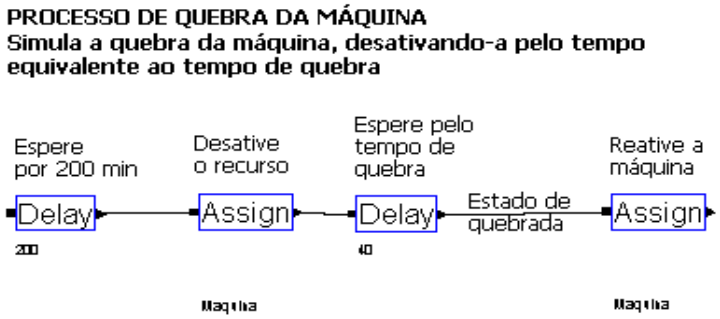


Figura 3-5: Exemplo da estipulação da lógica no software Arena

3.2.3.1.2 Dinâmica de Sistemas

Um outro tipo de simulação importante é a chamada Dinâmica de Sistemas ou *Systems Dynamics*, criada na década de 1960 por Jay Forrester (FORRESTER, 1961). Para a representação dos modelos é usado um conjunto limitado de blocos lógicos que são

interligados por linhas que exibem uma dependência entre eles. Essa representação é traduzida em um conjunto de equações diferenciais que forma um modelo matemático. Há representação gráfica apenas dos blocos lógicos usados no modelo e de gráficos de saída. Mesmo em programas computacionais que seguem essa mentalidade, a representação da relação de proximidade mesmo que possível não será atualizada caso se mude de lugar um dos blocos lógicos do modelo, uma vez que os simuladores de *system dynamics* consideram apenas algumas relações e elementos fixos, não permitindo a expansão dos elementos manipuláveis pelo software (***Figura 3-6***). Não há uma relação entre a posição do bloco lógico no modelo e uma posição no espaço físico.

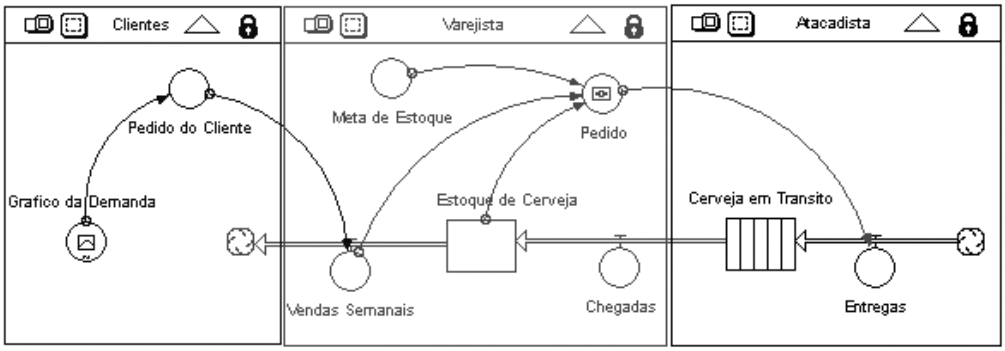


Figura 3-6: Exemplo de modelo construído usando o *software* de *Systems Dynamics* chamado Stella (ISEESYSTEMS, 2006)

As setas e fluxos mostrados na ***Figura 3-6*** servem apenas para indicar o uso da variável em outro bloco e não informações de intensidade. Por exemplo, ao se clicar sobre *Pedido*, no quadro *Varejista* da ***Figura 3-6*** tem-se acesso à fórmula que define o tamanho do pedido:

$$Pedido = Vendas\_Semanais + \left(\frac{Meta\_de\_Estoque - Estoque\_de\_Cerveja}{2} \right)$$

Assim, a seta que liga *Estoque de Cerveja* a *Pedido* apenas indica o uso da primeira pela segunda variável e não uma possível intensidade de fluxo. Da mesma forma,

Chegadas representa apenas a transferência de quantidades entre *Cerveja em Transito* e *Estoque de Cerveja*.

Pode-se concluir, portanto, que as aplicações de programas computacionais de dinâmica de sistemas prestam-se apenas para análises de balanço de massa, não possuindo capacidade de avaliação das características espaciais dos mesmos.

3.2.3.1.3 Diagramas de Ciclo-Atividade

Assim como os simuladores, algumas técnicas de representação usadas em Simulação não se prestam à representação e manipulação das relações como se apresentam nos estudos de arranjo físico. O Diagrama de Ciclo-Atividade ou ACD (*Activity Cycle Diagram*) possui essa limitação uma vez que representa apenas dois estados e setas, representando a seqüência lógica do processo modelado (***Figura 3-7***). Os estados permitidos são o inativo (*dead state*) e o ativo. No primeiro, representado por círculos, as entidades que fluem pelo modelo permanecem inativas em filas. No segundo, representado por retângulos, são executadas as atividades, entendidas em última análise como tempo decorrido.

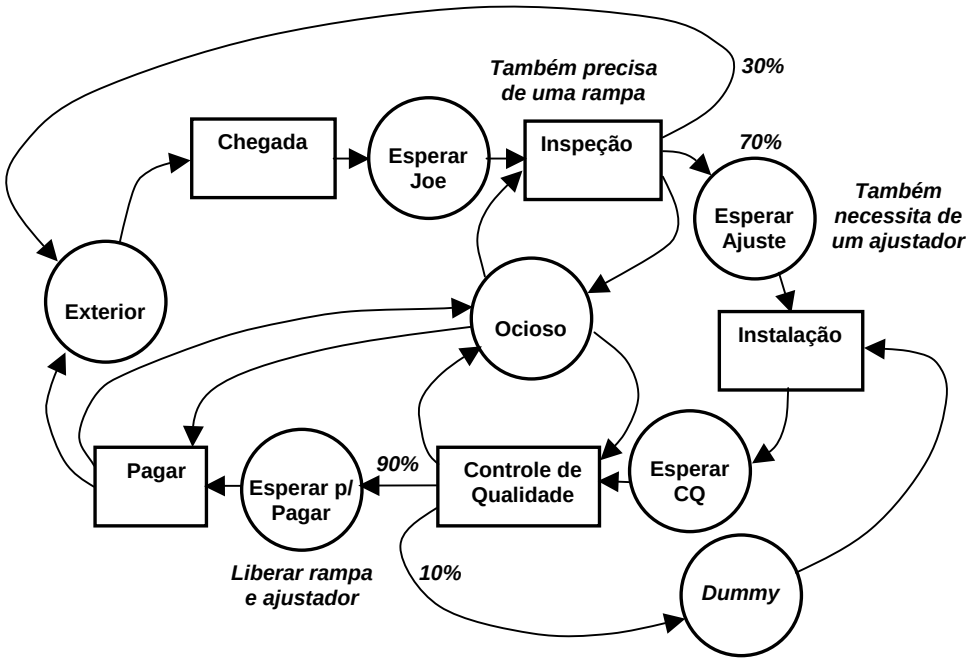


Figura 3-7: Diagrama de ciclo-atividade para uma loja de troca de escapamentos de veículos. (Adaptado de PIDD, 1996).

O modelo da ***Figura 3-7*** descreve o processo de instalação de um escapamento em um carro. O processo é iniciado na fila *Exterior* seguida imediatamente pela atividade *Chegada*. Após esse evento as entidades entram em um estado inativo, à espera de *Joe*, o mecânico. Para que a inspeção do veículo ocorra é necessário que haja entidades à espera de Joe e que a entidade representante de *Joe* esteja em seu estado inativo *Ocioso*. Após a *Inspeção*, se houver necessidade de uma rampa (o que ocorre em 30% dos casos) o cliente retorna ao início do processo. Em 70% dos casos, o cliente é atendido e espera pela atividade *Instalação*. Depois disso as entidades entram novamente em um estado inativo à espera do *Controle de Qualidade*. Depois dessa atividade, 10% dos casos necessitarão de uma nova instalação enquanto 90% seguem para a fila de espera pela atividade *Pagar*. Finalmente a entidade que representa o cliente volta ao *Exterior*, enquanto a entidade que representa Joe volta ao estado *Ocioso*.

A modelagem no ACD observa apenas as atividades e sua seqüência. Não há a representação dos recursos e, conseqüentemente, das relações entre eles. Além disso, é exigido que os estados ativos e estados inativos se intercalem, o que obriga a colocação do estado inativo *Dummy* mostrado na ***Figura 3-7*** e que não existe no sistema representado pelo modelo. As porcentagens referem-se às quantidades de entidades que seguem para o estado seguinte. Atualizações dessa técnica incluem a possibilidade de modelos hierarquizados (KIENBAUM & PAUL, 1994) e o uso da linguagem XML (*EXtendable Markup Language*) (GIL & HIRATA, 2003).

Pode-se concluir que essa forma de representação não pode ser usada de forma adequada para a representação de arranjos físicos de tal forma que permita a sua alteração e avaliação de forma simultânea. A seqüência modelada na lógica dos modelos é incapaz de representar as distâncias, freqüências e tempos necessários para caracterizar os fluxos de materiais, por exemplo.

3.2.3.1.4 Uso de elementos internos das ferramentas de simulação em arranjo físico

Cada uma das representações comentadas anteriormente possui elementos internos para cumprir seus objetivos. Esses elementos internos são funções disponíveis em um simulador e são usadas para representar elementos do sistema real. O **QUADRO 10** lista os elementos mais comuns e como eles poderiam ser usados para representar elementos do problema de arranjo físico. Apesar de serem elementos de softwares baseados em conceitos diferentes com simulação de eventos discretos e contínua, esses elementos cumprem funções similares.

Elemento	Arena	AutoMod	Stella	Diagrama de Ciclo-Atividade	Utilidade para a representação dos arranjos
Recurso	Resource	Resource	Estoque[1]	Inexistente	Capacidade de Equipamentos
Variável	Variable	Variable	Estoque	Inexistente	Representar valores como intensidade de fluxo total etc
Atributo	Attribute	Attribute	Inexistente	Inexistente	Características dos produtos
Fila	Queue	Queue	Estoque	Círculo[2]	Estoques
Atividade	Delay, Process, Server etc. [3]	Use, Wait etc. [3]	Estoque	Retângulo[4]	Uso dos recursos
Seqüência lógica	Conector	Ordem das linhas de código; Comando Send To	Fluxos e Setas	Seta	Seqüenciamento do processo de fabricação
Contador	Counter	Counter[5]	Variable	Inexistente	Contar número de viagens de transporte
Relação de Proximidade	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Posicionar áreas próximas umas às outras
Implicação/ Influência	Inexistente [6]	Inexistente [6]	Fluxos e Setas	Inexistente	Indicar como critérios de avaliação se afetam

QUADRO 10: Comparação entre os diferentes elementos representados no programa (não-exaustiva)

Com relação ao **QUADRO 10**, deve-se salientar que:

1. No Stella existem três tipos de estoques: fila, esteira e forno (*queue*, *conveyor*, *oven*). Não possuem todas as funcionalidades dos recursos dos softwares de simulação de eventos discretos.
2. No ACD, os círculos permitem a especificação do tempo da atividade.
3. No Arena e no AutoMod filas são entendidas como as entidades que estão em um estado inativo.
4. No ACD, os retângulos que definem as atividades não permitem a especificação do tempo da atividade.
5. Os contadores no AutoMod possuem lógica de controle de capacidade parecida com as de recursos, diferentemente dos contadores do Arena que apenas contam as entidades que passam pelo bloco.
6. Valores são utilizados através de variáveis e atributos, não havendo representação gráfica do uso como em *Systems Dynamics*.

Pode-se concluir que as ferramentas de simulação apresentadas anteriormente foram criadas para representar a seqüência dos processos. Quanto à geração de novas soluções de arranjo físico, não permitem facilmente a alteração do arranjo para a criação de novas alternativas. Essas ferramentas contribuem para a análise das soluções de arranjo físico ao permitirem a análise dos processos de produção que ocorrerão em uma solução dada. Isso implica em grande esforço de modelagem uma vez que as novas alternativas têm que ser modeladas novamente a cada alteração importante no arranjo físico.

3.3 Fatores importantes para programas computacionais para o desenvolvimento de arranjo físico

3.3.1 Características gerais

Torres (2001) propõe a integração das ferramentas computacionais existentes como forma de obter uma ferramenta adequada para o projeto de instalações industriais. O uso de ferramentas integradas permite evitar (p.122-4):

- perda de informações na transferência de arquivos entre as ferramentas;
- incapacidade ou dificuldade para representação adequada e única dos centros de produção;
- dificuldades de comunicação entre os diversos modeladores;
- duplicação de esforços;
- existência de hiato temporal entre o desenvolvimento da representação em cada uma das ferramentas;
- inexistência de funções de controle de versões de alternativas e seus respectivos arquivos;
- ausência de relatórios integrados;
- inexistência de uniformidade nas representações.

Esse tipo de ferramenta deve apresentar funções capazes de analisar aspectos de ergonomia, permitir a alteração das alternativas através de uma interface CAD e disponibilizar as capacidades de análise da simulação de sistemas. As características levantadas estão mostradas no **QUADRO 11**.

Funcionalidade	Funções desejáveis
Analisador Ergonométrico	• Análise de esforços • Base de dados antropométricos personalizável • Tridimensional • Análise dinâmica • Animação gráfica • Troca de arquivos de CAD • Integração via dados ou programática • Modelos mais realistas do elemento humano • Detalhar os locais de trabalho • Ferramentas de criação de consenso e documentação • Simulação de condições de trabalho de forma dinâmica e seu impacto sobre o trabalhador • Capacidade de interação com sistemas reais
Sistema de CAD	• Criação de desenhos • Personalização da interface • Tridimensional • Criação de atributos • Troca de arquivos de CAD • Integração via dados ou programática • Ferramentas de *Layout*:, CRP, layout de blocos, diagramas de relacionamento, cartas de processo, análise de fluxos etc. • Bibliotecas de símbolos paramétricos • Criação de representações detalhadas do arranjo • Possibilidade de manipular interativamente o arranjo e observar os impactos ocorridos • Uso das ferramentas e técnicas tradicionais de arranjo físico de forma inovadora • Análises globais e de detalhadas • Documentação automática e adequada de alternativas • Registro de todas as alterações feitas • Interface amigável de modificação e de interação • Encapsulamento dos dados • Uso de bibliotecas com dados encapsulados • Capacidade de reutilização de elementos gráficos já existentes • Possibilidade de compartilhar elementos • Vinculação de arquivos • Automatização de análises de praxe • Obtenção automática de dados de sistemas de gerenciamento e outras bases de dados da planta • Documentação automática de alternativas • Comparação automática entre várias alternativas de acordo com os critérios estabelecidos. • Geração de cenários para avaliação • Capacidade de experimentação máxima com o projeto: realidade virtual. • Capacidade de indicar alterações no arranjo em decorrência de alterações nos produtos • Visualização e experimentação de fatores ambientais e de satisfação no trabalho e de segurança • Análise da ocupação espacial e dimensionamento de áreas • Tratamento relevante de áreas de apoio ou secundárias • Apoio do desenvolvimento de sistemas de utilidades. • Troca eletrônica de informações
Simulador	• Modelagem de sistemas discretos e contínuos • Relatórios personalizáveis • Projeto de experimentos • Interatividade na animação • Integração via dados ou programática • Interface com base de dados • Tridimensional • Possibilitar analisar o funcionamento do arranjo através da análise estatística do seu desempenho. • Identificação automática de gargalos e proposição de causas e de melhorias • Balanceamento automático de processos • Capacidade de interação com equipamentos reais

QUADRO 11: Lista de características desejáveis de um software integrado (TORRES,2001).

3.3.2 A interface

Para recuperar as facilidades de geração dos modelos icônicos manipuláveis é necessário um modelo digital icônico facilmente alterável e que possua um alto grau de representatividade dos objetos do mundo real. Esse modelo deve permitir a implantação de uma interface em que os focos de atenção e de ação do usuário estejam na mesma posição. Nesse sentido, as tecnologias de RV e RA parecem ser a solução apropriada para isso.

Com a adoção dessas tecnologias é possível gerar as várias soluções que devem ser avaliadas para se chegar às soluções que serão detalhadas. Como as equipes de projetos envolvem pessoas com diferentes formações, o sistema que suporta a modelagem deve permitir o trabalho em grupo presencial e à distância. Deve permitir também a atividade individual, onde serão geradas soluções coerentes de acordo com os conceitos de um certo mundo-objeto.

3.3.3 Os objetos

Para incluir os modelos de avaliação quantitativos não podem ser implementadas computacionalmente as limitações dos primeiros modelos icônicos em que as avaliações quantitativas eram realizadas separadamente das soluções geradas. Deve existir uma relação direta entre a disposição dos elementos do arranjo físico e as métricas de quantificação. Isso implica em que os algoritmos devem poder extrair diretamente os dados necessários a partir de uma representação icônica.

W. J. DAVIS (1998) afirma que, em geral, o desempenho do sistema depois de instalado é inferior ao obtido pelo modelo, devido a simplificações feitas durante o processo de modelagem e que a natureza dos modelos deve ser alterada para permitir que possam ser usados de maneira a obter todos os benefícios oferecidos pela simulação. A evolução dos

modelos deve ser observada de acordo com três eixos: uso do modelo, reutilização e escopo de modelagem (***Figura 3-8***). Davis (op. cit.) conclui, que:

a) muitos modelos são feitos para apenas uma célula. Além disso, não conseguem com que células modeladas independentemente uma da outra possam ser interligadas;

b) os modelos atuais são feitos para uma situação específica e são descartados depois de se atingirem as metas do estudo inicial. Entre as formas de se aumentar essa reusabilidade estaria a possibilidade de integrar modelos dentro de modelos ou encontrar usos alternativos. A forma ideal de reusabilidade dos modelos seria a criação de estruturas que poderiam compartilhar os modelos entre si, utilizando o conceito de objetos.

c) o uso dos modelos também deve evoluir, do planejamento fora de linha (off-line) para o controle inteligente em tempo real (on line). Os modelos não serão apenas usados para planejar sistemas mas também para controlá-los em tempo real.

d) os modelos de simulação devem ser incorporados às atividades de controle de chão-de-fábrica;

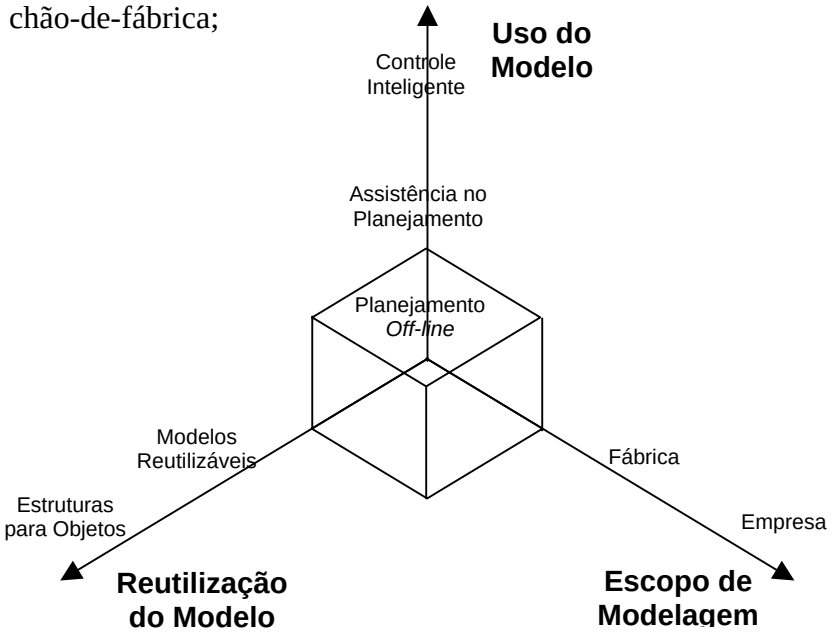


Figura 3-8: Perspectivas de evolução dos softwares de simulação (Adaptado de DAVIS, 1998).

Para que seja possível incorporar os modelos quantitativos aos icônicos é necessário que o usuário possa associar dados do seu interesse de uma forma fácil e livre. Alguns sistemas possuem essa capacidade, mas o usuário tem que se preocupar com qual o tipo do dado, por exemplo. Essa preocupação deve caber ao desenvolvedor do programa ou deve ser deixada para um momento posterior, permitindo que o usuário, durante a criação do arranjo físico não tenha sua atenção desviada do que realmente importa.

3.3.4 As relações

Descrever livremente os objetos e poder manipulá-los diretamente não é suficiente. O desenvolvimento de arranjo físico é fortemente baseado no posicionamento relativo entre objetos. É necessário, portanto, permitir a modelagem de relações entre os objetos, tanto as quantitativas quanto às qualitativas. Dessas, as mais tradicionais são as relações de proximidade registradas na CDP. Daquelas, a mais tradicional é o cálculo de fluxo de materiais. Mais do que permitir o estabelecimento dos relacionamentos tradicionais, deve ser possível estabelecer novos tipos de relações e, quando possível, de métricas para sua avaliação. Como exemplos de novos tipos de relacionamento pode se citar o risco aos operadores e a emissão de poluentes.

O uso de entidades e de relacionamentos compõe a base da teoria de simulação, assim como de muitas outras representações utilizadas em várias áreas de conhecimento humano. Exemplos comuns são os grafos (WILSON, 1985), redes de Petri (PROTH, 1996), diagramas de ciclo-atividade (GIL & HIRATA,2003), mapas de relacionamentos (ABREU, 2004), mapas cognitivos (RIEG & ARAÚJO FILHO, 2003). Além das áreas de engenharia e informática, outras áreas, como a das ciências humanas, usam representações análogas. Dois exemplos são: (a) a treliça dinâmica (***Figura 3-9***), onde o psicólogo inglês Raymond Cattell procurava apresentar a inter-relação entre traços de personalidade e como uns subsidiavam

outros e (b) mapas mentais, usados para apresentar conceitos relacionados de uma área do conhecimento (***Figura 3-10***).

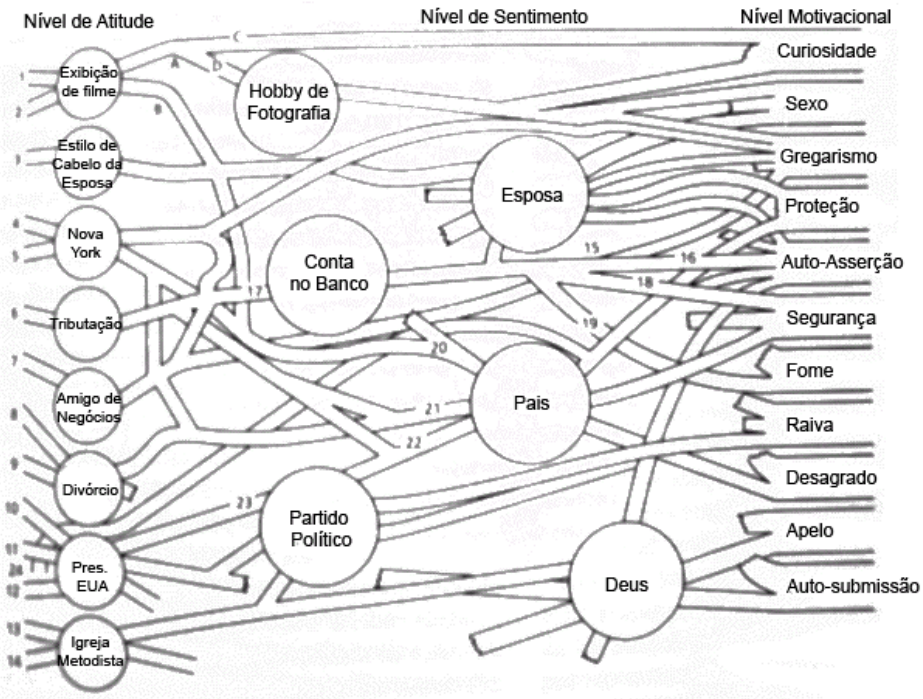


Figura 3-9: Porção de uma treliça dinâmica de Cattell. À direita estão as atitudes de um típico homem dos EUA, no meio os sentimentos e à direita os impulsos biológicos básicos (HALL et al., 2000, p. 267)

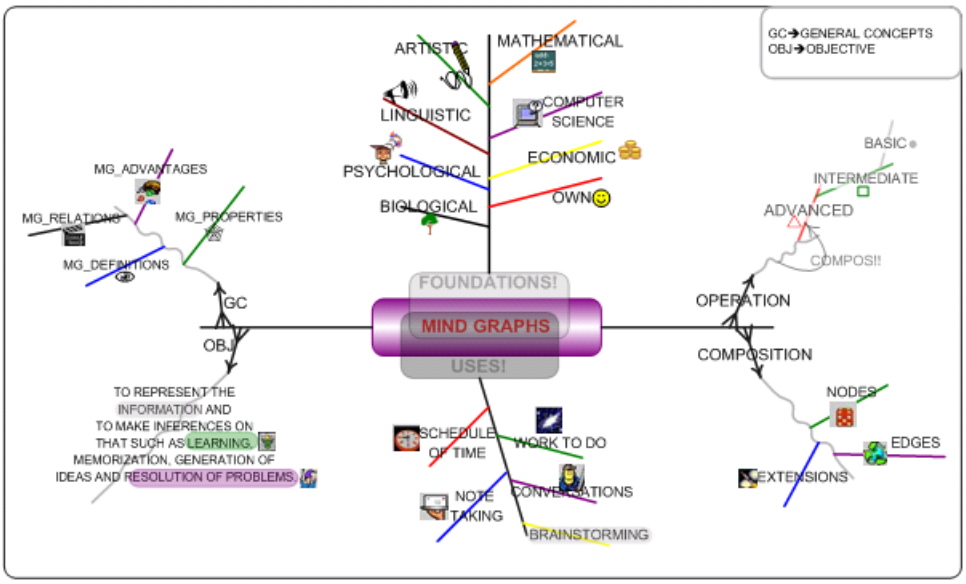


Figura 3-10: Representações usadas no arranjo físico e que são modelos do tipo entidade-relacionamento Um mapa mental explicando mapas mentais (MINDGRAPH, 2006).

No caso dos modelos usados em arranjos, essa forma de representação fica patente no caso dos elementos mostrados no **QUADRO 12**.

Representação	Entidades	Tipo de relação
Carta De-Para	Áreas/Equipamentos	Fluxo de materiais e informações
Carta de Relações Preferenciais	Áreas/Equipamentos	Proximidade
Diagrama de Relacionamento	Áreas/Equipamentos	Fluxo de materiais/ Proximidade
Fluxograma de Fabricação e Montagem	Operações sobre o materiais	Seqüência de produção
Rede PERT	Atividades de projeto ou operação sobre o produto	Seqüência das operações / Tempo
Mapa de Fluxo de Valor	Centros de Trabalho	Tempo entre Centros de Trabalho, Estoques, Fluxo de Informações e Materiais
Modelo icônico com linhas de lã	Áreas de atividade	Fluxo de materiais
Carta de Relacionamento Funcional	Áreas de atividade	Proximidade
Carta de Processos	Operações sobre o produto	Seqüência de produção

QUADRO 12: Representações usadas no arranjo físico e que são do tipo entidade-relacionamento.

Todas essas representações caracterizam-se por serem binárias, isso é, envolvem somente duas entidades simultaneamente. Computacionalmente essas relações podem ser transformadas em grafos (***Figura 3-11***), que podem compartilhar um mesmo mecanismo de armazenamento e manipulação.

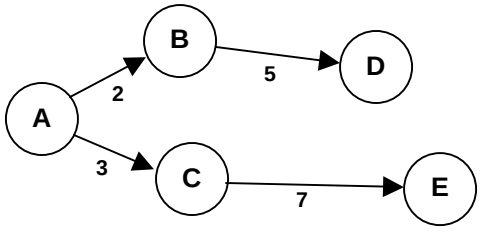


Figura 3-11: Exemplo de um grafo direcionado (dígrafo).

Grafos (HIRSCHFELD, 1985) são formados por nós (vértices) e arcos (arestas). Geralmente os nós são associados a objetos e as arestas/arcos associadas a relações entre os objetos. Cada arco pode ter um peso que pode representar freqüências, intensidade de relacionamento etc.

Devido à sua flexibilidade e simplicidade, os grafos são aplicados a várias áreas de conhecimento e têm sido estudados há bastante tempo, possuindo vários algoritmos desenvolvidos para calcular menor distância, existência de ciclos etc. Uma aplicação tradicional de grafos é o problema logístico do caixeiro viajante, onde os vértices representam os destinos das visitas do caixeiro e os arcos os caminhos a percorrer. A cada arco é associado um peso, que nesse problema é entendido como a distância do trajeto. Quando os arcos são orientados, o grafo é chamado de grafo direcionado ou dígrafo. Quando os arcos não formam um ciclo fechado, o grafo é dito acíclico.

No caso do arranjo físico, por exemplo, os dados de uma CRP podem ser transformados em um grafo/rede de relacionamentos qualitativos onde os nós são as áreas de atividade e os arcos as relações de proximidade (***Figura 3-12***).

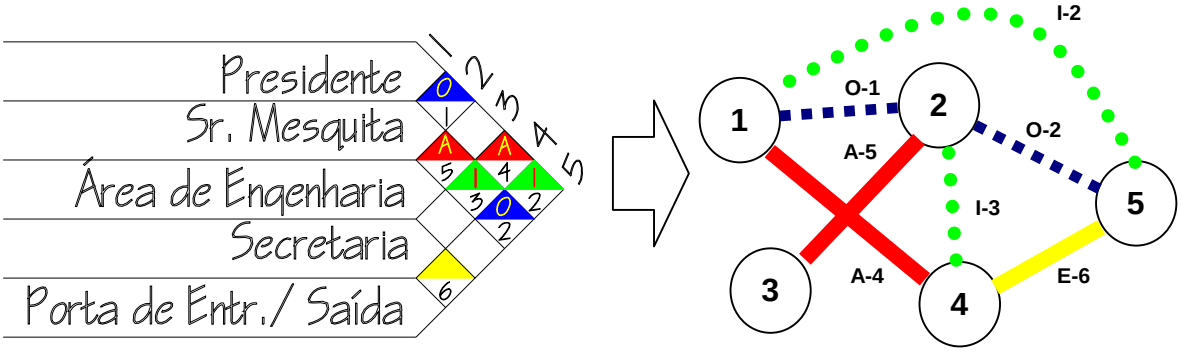


Figura 3-12: Transformação da CRP em um grafo de relacionamento quantitativo.

A implementação como grafos dessas representações e o fato delas compartilharem os mesmos dados permite que sejam aplicados procedimentos

computacionais de melhoria sobre as redes de relacionamentos. A teoria dos grafos tem desenvolvido vários métodos para detecção de ciclos, de menor caminho entre outros. Com uma representação homogênea, o usuário do programa computacional pode escolher um dos grafos (ou parte dele) e aplicar vários algoritmos, na seqüência desejada. Esses algoritmos podem ser adicionados à medida que são desenvolvidos, formando extensões para o programa computacional.

3.3.5 As regras

Os objetos definem os elementos que são manipulados e as relações as influências que existem entre esses objetos. No decorrer da manipulação do arranjo fisico, são feitas escolhas feitas com base em fatos e hipóteses, seja para cumprir uma tarefa, seja para explorar novas possibilidades. Nesse processo são explicitadas regras que tratam de como os objetos e as relações serão mobilizados. Essas regras são as mais diversas, considerando desde aspectos estratégicos, como a intenção de incorporação de conceitos de manufatura enxuta, até aspectos materiais como “máquina 1 requer base resistente”. Outros exemplos incluem: “se a produção aumentar teremos que usar uma esteira entre a produção e o acabamento”, “se adotarmos a idéia da célula, vamos ter que diminuir o número de operadores”, “com um volume desses teremos que usar *layout* em linha”.

Essas regras devem ser registradas pois revelam aspectos importantes do processo de desenvolvimento da solução e da própria solução. Se forem registradas podem ser verificadas posteriormente. Como o conjunto de regras pode variar de um participante da equipe de projeto para outro, espera-se que no momento da verificação sejam identificados consensos, contrapartidas e pontos de discussão entre os diferentes mundos-objetos.

3.3.6 As ajudas visuais e anotações

Além dos elementos componentes do sistema que devem ser estruturados de tal maneira de modo a permitir um modelo integrado para o desenvolvimento e análise de arranjo físico, existem os desestruturados. As ajudas visuais e anotações cumprem esse papel pois aumentam o conteúdo informacional do modelo e podem ser feitas em uma linguagem particular do usuário. Essas anotações podem ser empregadas para rascunhar uma alternativa ou comentar uma existente e devem poder ser guardadas para referência futura. Um exemplo dessas ajudas visuais são as linhas desenhadas sobre o arranjo de gabaritos mostrados na Figura 2.16. Como a representação principal (os gabaritos) foi necessário desenhar as linhas sobre a página quadriculada.

3.3.7 Características desejáveis de uma ferramenta para desenvolvimento de arranjo físico

De forma resumida, um programa para desenvolvimento de arranjo físico deve possuir as seguintes características:

(a) Modelo icônico flexível e expansível

(b) Interface fácil

(c) Permitir trabalho de forma individual e em grupo, presencial e à distância.

(d) Modelo icônico e de quantificação devem estar sincronizados

(e) Modelos devem poder trocar informações entre si

(f) Construir modelos que possam conter outros sub-modelos

(g) Os modelos devem ser desenvolvidos para poderem ser utilizados para o controle diário do sistema real

(h) Os modelo devem poder ser usados para estudos em linha com o sistema real, além do uso tradicional.

(i) Usar uma base comum para representação computacional

(j) Deve existir facilidade de anexação de dados

(k) Modelar relações qualitativas e quantitativas

(l) Permitir a criação de relações diferentes das tradicionais

(m) Permitir o desenvolvimento de novas métricas

(n) Permitir a criação de regras

(o) Regras devem permitir considerar informações qualitativas e quantitativas, estruturadas ou não

(p) Regras devem ser registradas

(q) Regras devem ser verificadas

(r) Permitir a criação de regras específicas para cada mundo-objeto

(s) Permitir a avaliação comparativa de regras

3.4 Conclusões

Como decorrência da impossibilidade de manipular o arranjo físico no próprio simulador ou programa de otimização, a representação no simulador dos elementos típicos que servem para descrever e analisar os arranjos torna-se muito difícil. Um modelo de análise de arranjo deve permitir a flexibilidade dos gabaritos usados tradicionalmente com o poder de análise dos simuladores. Ainda, de outra forma, um modelo de análise de arranjo físico deve ser composto de dois modelos interligados: um modelo icônico para representar os arranjos e modelos matemáticos para analisar e descrever o arranjo. Os modelos têm que ser solidários, isto é, cada alteração em um deles deve provocar um efeito sobre o outro, reduzindo o esforço

de tradução e re-tradução entre os modelos. Uma ferramenta computacional que implemente essa visão deve permitir um uso de forma que ambos os tipos de modelo integrados sejam alterados de forma conveniente e que apóie o processo de desenvolvimento de arranjo físico e não sirva apenas para avaliar soluções.

4 O PROCESSO DO PROJETO DO ARRANJO FÍSICO E O PAPEL MEDIADOR DOS MODELOS

Neste capítulo o processo de desenvolvimento é apresentado como um processo desestruturado, interativo e iterativo. Nesse processo os modelos são usados como artefatos catalizadores de um processo de discusssão em que diversas visões coexistem e orientam o processo de geração e avaliação de alternativas de arranjo físico.

4.1 O processo de design

O processo de projeto de instalações é cada vez mais visto como um processo desestruturado que rompe com a tradição do *design* seqüencial. Essa desestruturação tem como algumas causas a grande iteratividade das atividades de projeto e a interatividade dos participantes do processo. Além disso, defende-se que o processo deve ser participativo. Os usuários diretos e indiretos do produto final devem ter uma participação mais ativa no desenvolvimento do projeto e não apenas como especificadores de características que serão usadas para direcionar a busca por soluções. Sendo assim, a pretensa seqüência, por si mesma uma abstração prescritiva, acaba por ser desfigurada. Segundo ARAÚJO (2001), as críticas feitas por vários autores ressaltam desde o excesso de uma literatura desestruturada sobre métodos de projeto à falta de uma teoria de base e de uma terminologia comum na área.

Para PUGH (1991), o fluxo principal (cerne) do *design*, inicia-se a partir do mercado e segue até o momento da venda do produto. É um processo iterativo em que cada estágio (especificação, projeto conceitual, projeto detalhado, manufatura) pode ser repetido e revertido inúmeras vezes por causa de mudanças nos objetivos, nas especificações de projeto etc. Esse fluxo de *design* principal é envolvido pela especificação do *design* do produto. A relação entre o fluxo principal e as especificações do processo de *design* se dá através de elementos de especificação (***Figura 4-1***). É a partir dos elementos de especificação que a solução será forjada e o resultado do processo será avaliado. Além disso, o cerne recebe em cada estágio entradas de dois tipos de técnicas: as diretamente relacionadas ao fluxo principal do *design* e aquelas dependentes das disciplinas e tecnologias envolvidas, específicas do domínio de conhecimento envolvido.

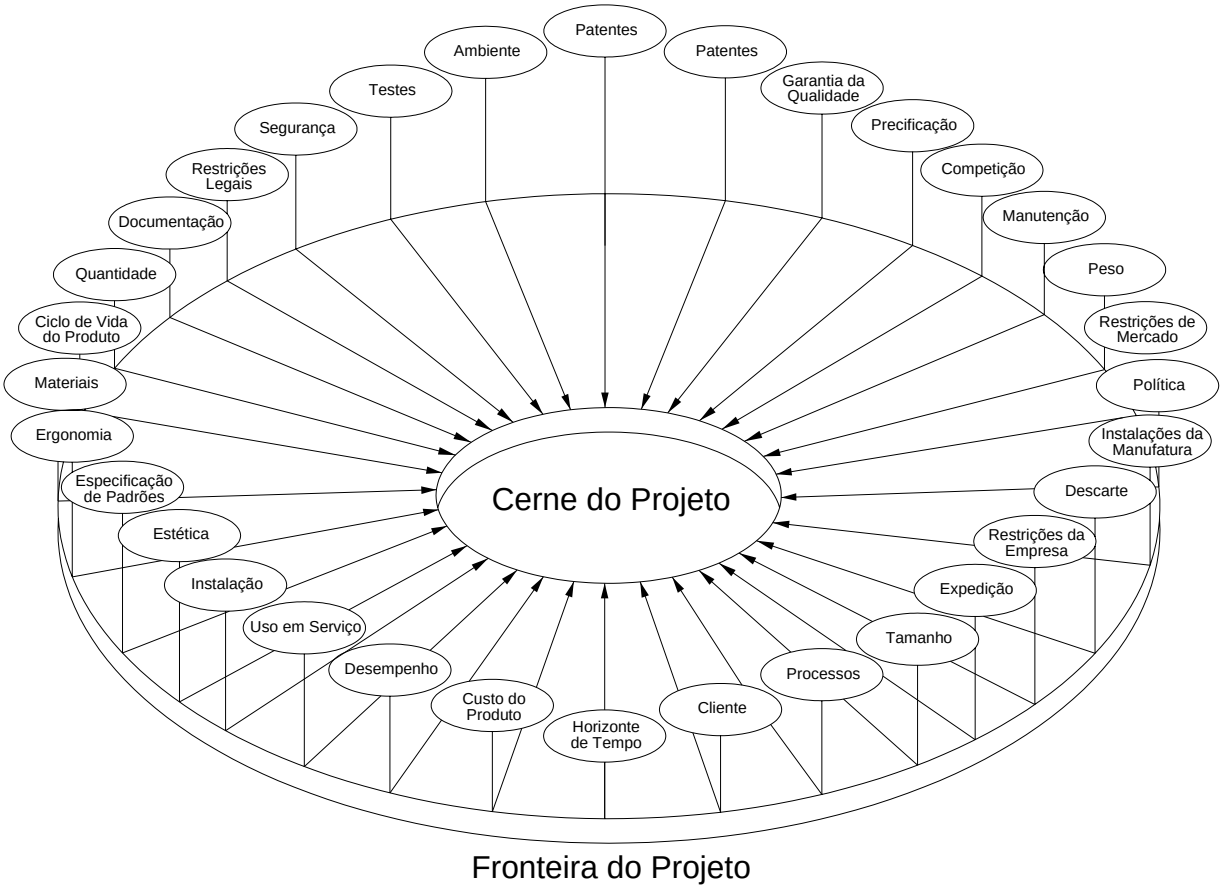


Figura 4-1: Elementos de especificação do processo de design (Adaptado de PUGH, 1991)

O processo de *design* é entendido de várias formas na literatura. ARAÚJO (1996) argumenta que os métodos de *design* podem existir em três formas possíveis:

a) na forma de informação estruturada que pode ser aprendida e que serve de base de dados e em geral tem um caráter prescritivo por parte de seu autor;

b) na forma de conhecimento estruturado, quando o método é aprendido de tal forma que o indivíduo possa aplicá-lo;

c) na forma de instrumentos, quando pode ser aplicado na forma de ação metódica, depois de aprendido pelo indivíduo.

Dadas as características subjetivas dos participantes do projeto, ARAÚJO (op. cit.) afirma que os métodos:

> "podem somente ser interpretados como instrumentos que levam à formulação dos pensamentos conscientes que precedem o pensamento do *design* (e a ação) . Esses meta-pensamentos (ou mini-planos) são responsáveis pela maneira pela qual o ator irá dispender seu arcabouço de conhecimentos visando o cumprimento da tarefa de *design* e que, como um todo, é influenciado por uma série de características internas pessoais inerentes ao ator".

Para LOVE (2006), esse processo interno descrito por ARAÚJO (op. cit.) deve ser chamado de *designing*, diferenciando as influências individuais das ações de *design* influenciadas pelo ambiente social, referidos como *processo de design*. Nesse sentido, HEATON (2002) destaca o efeito que o ambiente cultural exerce (até mesmo regionalmente) sobre as atividades de *design*, mesmo para produtos de alta tecnologia.

4.2 Participação nos projetos como forma de melhorar as soluções

Tradicionalmente os projetos de arranjo físico foram desenvolvidos com a participação de várias pessoas. A motivação para isso passa pela complexidade do problema

que demanda uma disponibilidade de tempo grande e de informações dispersas pela organização. A tradição do arranjo físico sugere que grupos de pessoas se reúnam e criem arranjos alternativos que serão posteriormente avaliados até que se consiga um produto final. Isso estimula a criatividade e a possibilidade de encontrar melhores soluções. Para MUTHER (1976), soluções que se apresentem razoavelmente diferentes entre si facilitam o processo de determinação do arranjo final.

Com relação à **participação**, PUGH (op. cit, p. 71) defende que o processo de projeto deve ser preferencialmente desenvolvido em grupos. No entanto, a geração dos conceitos deve ser feita individualmente. Depois de esgotadas as idéias sobre o produto, os conceitos devem ser selecionados e melhorados também pelo grupo. Segundo o autor, esse tipo de abordagem geralmente produz melhores resultados.

A qualidade gerada durante a fase de concepção, ainda segundo PUGH (op. cit., p. 73) , pode ser aumentada se alguns cuidados forem tomados: (a) geração de idéias individualmente com a especificação do *design* do produto em mente; (b) o fornecimento de meios para manifestar essas idéias para o grupo; (c) geração de idéias e sua racionalização de conceitos pelo grupo; (d) evitar a seleção, julgamento ou aceitação de idéias até que o grupo tenha exaurido as possibilidades; (e) geração pelo grupo de critérios de avaliação a partir da especificação de *design* do produto; (f) evitar o descarte de conceitos e idéias com base em gostos; (g) o estabelecimento de uma metodologia de seleção que não iniba a criatividade durante a seleção de conceitos, mas que estimule de forma positiva a emergência de idéias que não poderiam surgir de outra maneira.

A respeito da variabilidade de soluções, ARAÚJO (2001, p. 148) afirma:

> "A conclusão que pode ser tirada da pesquisa cognitiva é que as decisões tomadas pelos projetistas e conseqüentemente seu comportamento, não são feitas com base somente em dados objetivos (i.e., as instruções na declaração da tarefa e nas regras fornecidas pelos métodos). Elas são o resultado tanto de julgamentos avaliativos como predicativos que resultam da percepção subjetiva desses dados. A percepção

> subjetiva transforma dados objetivos em padrões de informação cheios de significado para o indivíduo. O significado e a significância ligados à informação são pelo menos em parte influenciados pelos sentimentos e emoções do indivíduo. Por causa deles serem altamente dinâmicos, somos levados à conclusão que dois modos de procedimento não podem ser similares, mesmo se dados os mesmos atores em duas situações similares".

4.3 Visões, domínios e restrições

No início ou durante o processo de *design* surgem várias restrições ou dificuldades que inviabilizam a adoção de uma determinada solução. Essas restrições podem também se manifestar na forma de contrapartidas que impedem que se atinja o máximo em todos os objetivos inicialmente traçados para o projeto. Como exemplos de objetivos gerais temos a satisfação da função técnica, a consecução da factibilidade econômica e a observância das necessidades de segurança tanto para humanos como para o meio ambiente (PAHL & BEITZ, 1986, p. 45).

As restrições e dificuldades podem ser impostas conscientemente pelos participantes do projeto, mas podem ser identificadas durante a tentativa de agir sobre a realidade com o intuito de dominá-la utilizando as técnicas disponibilizadas pela tradição. No processo de projeto, as técnicas são postas à prova e modificadas, há o desenvolvimento de novas técnicas e a construção de novos artefatos, como foi o caso do desenvolvimento das ferramentas de arranjo físico.

Dejours, em seu trabalho que discute as pesquisas sobre fator humano (DEJOURS, 2003) apresenta a técnica como um ato tradicional eficaz, em um processo de correlação entre o autor da ação (ego), os limites impostos pelo real e o outro (***Figura 4-2***).

O real representa os desafios da ação e é percebido quando as ações perpetradas redundam em fracasso, uma vez que o sucesso será creditado à ação. Se é possível prever as ações sobre o real, não é possível prever em toda sua extensão os efeitos produzidos,

o que confere ao real um grau de imprevisibilidade e de desconhecimento. O fracasso ou revés está associado à vigência de uma racionalidade instrumental, onde o ato é considerado racional se satisfizer à exigência de eficácia em relação a um fim determinado.

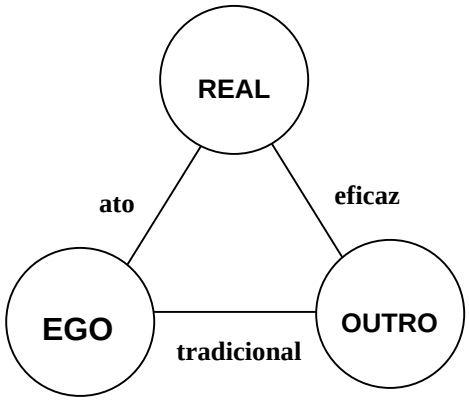


Figura 4-2: Conceitualização de técnica segundo DEJOURS (2003).

A ação do ego sobre o real pressupõe uma mediação de um instrumento concreto ou abstrato e também o engajamento do corpo de quem pratica a ação. A ferramenta pode ser entendida como uma extensão do gestual do corpo.

A avaliação do resultado da ação sobre o real depende da percepção do outro, que reconhece uma mudança relevante no real e não simplesmente da percepção do ego. O reconhecimento dessa ação como técnica, ou seja a sua legitimação através da tradição, passa também pelo reconhecimento do outro, que reconhece aquele ato como uma melhoria incremental ou de ruptura em relação à técnica preexistente. Como afirma Dejours (op. cit, p. 36):

> "A dimensão tradicional do ato técnico é então o que faz a ligação entre o ego e o outro, no triângulo da tecnologia; é a parte propriamente intersubjetiva, social ou cultural da construção de uma conduta técnica. Portanto, a técnica e não somente uma técnica do corpo, mas também uma técnica cultural"

No processo de construção de soluções, as ferramentas podem ser aplicadas em busca do reconhecimento do outro em favor de uma solução proposta. Nesse caso, as

ferramentas ganham ainda mais o papel de meio de comunicação com o outro. Ferramentas comunicativas prestam-se portanto, a mitigar os reveses do processo de interação entre o ego e outro através do real, reduzindo assim parte das restrições oriundas dos limites da percepção do outro.

Em um processo coletivo de *design*, pode haver um conjunto maior de restrições a respeitar e objetivos a atingir, nem sempre congruentes. SCHÖN (1988), BUCCIARELLI (1988) e RASMUSSEN (1990) classificam um conjunto de *designers* com visões similares e que compartilham as mesmas metas como *design partners* ou como um domínio. BURNS & VICENTE (2000), em uma aplicação desse conceito, apresentam domínios como: (a) *design* ergonômico, (b) *design* estrutural, (c) implementadores (preocupados com a materialização das soluções), (d) clientes (que iniciam e terminam o processo de *design*) e (e) gerência do projeto. À medida que mais pessoas participam do processo de *design*, pode-se esperar que mais domínios passem a integrar o espaço de solução do projeto, havendo o estabelecimento de mais restrições e objetivos secundários que passam a contrabalançar os objetivos ou seus determinantes.

Nesse momento deve-se distinguir pelo menos dois tipos de restrições que surgem no processo de *design* (BURNS & VICENTE, 2000): (a) as restrições relativas ao contexto do que está sendo projetado, como, por exemplo, “a área ocupada não deve exceder o espaço da câmara” e (b) as restrições do processo de projeto devidas à divisão de tarefas de projeto ao longo do tempo, como, por exemplo, “precisamos reservar a área para o gerador mas o projeto dele ainda não existe”.

Para Bucciarelli (1998, 2004), o processo de projeto é um processo social, que requer a participação de diversas pessoas com diferentes competências, responsabilidades e interesses técnicos. Cada participante vê o mundo de acordo com o paradigma da sua

disciplina e da sua posição de responsabilidade. Pessoas diferentes trabalham dentro de mundos-objetos diferentes. Há um objeto de *design*, mas diferentes mundos-objetos.

Mundos-objetos são diferentes com relação às ferramentas técnicas usadas, conjunto de imagens usadas, modos de modelar, linguagem e demais dispositivos empregados. Dentro de um mundo-objeto, como norma, há uma lógica, um pensamento instrumental que comanda o jeito que se vê, se interpreta ou se representa o objeto do *design* e seu comportamento. Isso confere ambigüidade ao processo de projeto, que somada à incerteza da busca por novas soluções torna impossível a existência de um método instrumental que reconcilie ou otimize os planos e propostas individuais dos participantes.

Essa problemática do estabelecimento de conceitos e soluções em um espaço de soluções concorrentes visando um conjunto de objetivos foi tratada em várias áreas do conhecimento de alguma forma como, por exemplo, a análise de multi-critérios (MOUSSEAU, 2003). No campo de *design* temos como exemplo o trabalho de DENG et al. (2000) que estabeleceram um formalismo para a verificação de restrições de projeto conceitual de dispositivos e equipamentos. Outro exemplo de como auxiliar a abordagem desse problema em projetos conceituais é a adoção de métodos como mapeamento cognitivo (PAHL & BEITZ, idem, p. 49).

4.4 Conflito e mediação através de artefatos

No *design* participativo iterativo, os domínios e visões participantes do processo de *design* podem estabelecer entre si relações de competição e de cooperação ao longo do projeto, de maneira ocasional ou intencional.

O projeto de instalações e de arranjo físico constitui-se em uma situação em que vários condicionantes nem sempre coerentes têm que ser mediados. Por exemplo, a

instalação deve suportar as necessidades decorrentes das atividades de trabalho, o que, por sua vez, traz para o projeto das instalações os conflitos iniciados e presentes nessas atividades. MENEGON (2003, p. 5) afirma que:

> "dado o caráter integrador das atividades de trabalho, que condensam questões determinadas pelo que é produzido e as condições técnicas e organizacionais para a sua realização, as questões postas pelo ponto de vista da atividade [do trabalhador] produzem uma tensão com a lógica de racionalidade produtiva [defendida tradicionalmente pela organização] ao disputar o espaço de articulação entre os bens e serviços produzidos e as atividades de trabalho necessárias para a sua realização. Em última instância esta disputa se dá em torno de qual será a organização prescrita do trabalho, ou seja, os mecanismos de coordenação e os dispositivos técnicos e organizacionais que irão atuar no interior das situações produtivas."

Dada a disputa pelas soluções mais convenientes, fica também estabelecida a disputa pela disposição espacial dos recursos Nesse contexto, a comunicação de conceitos e suas implicações assumem um caráter de importância excepcional. Para PERRY & SANDERSON (1998), duas dimensões-chave do processo de *design* são as interações entre *designers* e outros detentores de recursos e a maneira pela qual os vários artefatos e ferramentas de *design* são usados e criados.

PERRY & SANDERSON (op. cit.) afirmam que:

> "o trabalho de *design* não pode ser mais conceitualizado adequadamente em termos de *inteligência* individual, nem como um processo linear com um conjunto de estágios de *design*, mas como uma situação na qual práticas de trabalho e aprendizado conjuntas e coordenadas evoluam e na qual artefatos ajudem a mediar e organizar a comunicação".

Para PUGH (op. cit.), a participação dos usuários demanda formas capazes de representar suas idéias com relação ao produto, sendo as matrizes de correlação uma das melhores formas para representar isso.

O uso de modelos (simbólicos, lógicos, maquetes, protótipos, de simulação e outros) como artefatos de mediação no processo de discussão de soluções é usual, tanto nas atividades de design de engenharia quanto na abordagem ergonômica. Como exemplo,

GARRIGOU et al. (2001) apresentam uma abordagem baseada em simulação como forma de mediar grupos multidisciplinares que tentam criar condições de mobilização de competências que são, em geral, fortemente heterogêneas e que possuem um reconhecimento social comumente desigual. No entanto, a simulação e outros modelos empregados têm um papel de mediação limitado às formas tradicionais de uso, onde os modelos utilizados são estanques e tratam de partes específicas do problema. Geralmente esses modelos são utilizados como forma de avaliação de alternativas concebidas em outro meio e são realizadas através de diferentes meios (plantas, maquetes físicas, maquetes digitais) e de cenários elaborados pelos ergonomistas.

Para PERRY & SANDERSON (op. cit.), artefatos formam uma parte do processo de *design* do produto e, ao mesmo tempo, orientam os participantes quanto ao aspecto cooperativo do trabalho deles. De forma mais específica, em relação às ferramentas computacionais, sugerem que sejam suficientemente flexíveis para suportar tanto a determinação da posição de uma etapa no processo assim como a identificação de quem tenha atuado sobre ele. Esse aspecto documental do processo de *design* também é defendido por LAMONDE et al. (2001) em projetos complexos e interativos, como os ergonômicos.

4.4.1 Modelagem de sistemas de produção

Modelos de simulação são importantes como ferramentas para estabelecer uma relação entre investimentos em tecnologia e retorno sobre esse investimento. A simulação tem a capacidade de considerar uma série de fatores que agem simultaneamente e de apresentar adequadamente os resultados para análise. Isso nem sempre é possível usando outros métodos tradicionais. Muitos modelos otimizantes têm baixo desempenho quando aplicados a problemas complexos e que contenham grande número de fatores.

Comparativamente aos modelos físicos e estáticos usados para a representação dos arranjos físicos, os modelos de simulação fornecem maior capacidade de representação, flexibilidade e qualidade dos resultados produzidos, pois já foram desenvolvidos para representar vários tipos de processo. Por essa razão, esta seção se refere aos modelos de simulação e aos métodos de modelagem da simulação para discutir a modelagem de sistemas de produção.

A atual tecnologia de simulação fornece recursos adequados para modelar a produção segundo uma lógica de desempenho econômico. No entanto, mesmo essa modelagem pode deixar detalhes importantes de lado, o que descola os resultados do modelo de simulação dos resultados dos sistemas reais em função do grau de parcialidade do modelo. Isso se torna ainda mais crítico quando um modelo deve considerar tecnologias, cuja representação em função da lógica econômica, não se dá de forma direta. Um exemplo disso são ganhos de produtividade que ocorrem no longo prazo em função de benefícios decorrentes da forma de organização do trabalho ou de intervenções ergonômicas. Outro exemplo é o dos ganhos de produção obtidos através de um rearranjo do trabalho e que não se mantêm devido a danos causados à saúde dos trabalhadores a médio e longo prazo.

O desenvolvimento de modelos de simulação, por mais forte que seja o apelo da imagem de resolução de problemas de forma racional determinista (da lógica modernista) se dá sob uma série de influências ambientais e temporais/contingenciais. Como exemplos temos a pressão do contratante por resultados rápidos a partir do modelo e a inutilização de um modelo por conta de decisões gerenciais abruptas.

Durante o processo de desenvolvimento de modelos de simulação os analistas de sistemas produtivos enfrentam uma série de dificuldades de modelagem. M. ZILBOVICIUS (1999) apresenta uma discussão sobre a gênese, lógica e a difusão de modelos de organização da produção que pode ser aplicada à construção de modelos de simulação e

que permite entendê-las. Por modelo entenda-se o modelo conceitual (e seu correspondente computacional) desenvolvido e modificado pelo analista de sistemas produtivos a partir de práticas encontradas no sistema real (realidade). O terceiro elemento é o ambiente econômico, social e cultural sob o qual se desenvolve a realização das práticas e a construção do modelo (***Figura 4-3***).

A **interação entre as práticas e o ambiente** explicita: (a) a ação dos fatores do ambiente sobre as práticas, através da aceitação/rejeição dos resultados produzidos e das práticas em si e (b) o efeito de condições locais e mecanismos de reforço para que as práticas legitimadas se perpetrem. Esse tipo de interação mostra que as práticas sofrem uma série de influências do ambiente e que concorrerão com as prescrições do modelo institucionalizado pela manifestação no real. Ou seja, as práticas reais serão o produto do embate, sob certas condições, entre modelos de ação e as possibilidades oferecidas pelo ambiente (incluída aí a tecnologia real disponibilizada). O escopo desse embate pode ser o do projeto das instalações, da unidade industrial, da empresa, do ramo da indústria etc.

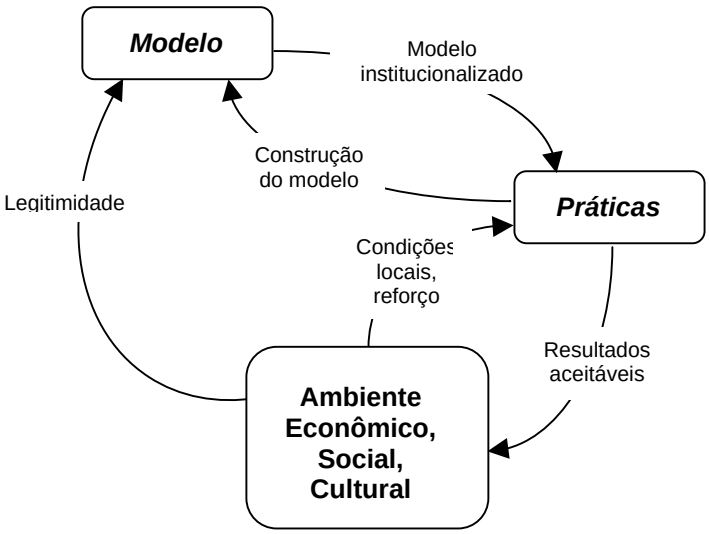


Figura 4-3: Gênese e difusão de modelos. Modificado de ZILBOVICIUS (1999).

Modelos desenvolvidos através de estudos de simulação, mesmo que contando com o reconhecimento institucional são apenas modelos de ação (modelos de tecnologia) que serão realizados de forma parcial ou pelo menos de forma diferente. Se por um lado o aumento do detalhamento do modelo não assegura a veracidade dos resultados, por outro há a explicitação dos condicionantes tecnológicos postos em confronto com os condicionantes ambientais não redutíveis à lógica do desempenho econômico. Como ferramentas de apoio à decisão esses elementos têm que ser explicitados no modelo para que o decisor exercite suas capacidades, considerando então uma riqueza maior do cenário sob o qual a necessidade de decisão foi motivada. Além disso, ao considerar elementos reconhecidos pelo ambiente como válidos, há a possibilidade de aumento da legitimidade do modelo e das ações decorrentes da sua análise.

A interação **modelo-práticas** arremete aos efeitos do modelo sobre as práticas e que, em última análise, é o objetivo do analista ao desenvolver seus modelos de simulação. Ao desenvolver o modelo, o analista de simulação cumpre sua tarefa. Possivelmente esse modelo sofrerá modificações para ser otimizado, sob a óptica dos indicadores de desempenho. Todavia, essas alterações realizadas no modelo do sistema real se forem implementadas terão impactos imprevistos, posto que não foram modeladas, sobre o sistema social/cultural vigente.

A aplicação de modelos institucionalizados poderá influir sobre as práticas vigentes, o que nos alerta para a importância de que tipos de impactos ocorrerão. Impactos positivos e negativos estarão ocorrendo simultaneamente ao longo do tempo e podem se anular. A efetividade das práticas preconizadas será julgada no embate com o real, tal qual apontado acima. Por exemplo, ganhos de produção ocorrerão de imediato através da implantação de uma nova forma de dividir o trabalho, contudo, as doenças do trabalho acabarão por anular os ganhos no longo prazo.

Um aspecto importante a ressaltar é que os elementos que não estão no modelo terão efeitos imprevisíveis sobre o mesmo. Modelos abstratos poderão ter sucesso para representar a estrutura tecnológica sob a qual as atividades se desenvolverão. Entretanto, nada dirão sobre os detalhes que serão negociados no momento da execução e que poderão contradizer os princípios do modelo e poderão colocá-lo em xeque. O que não está modelado é que terá que ser adaptado para que o que foi considerado ocorra como planejado. Um excesso de adaptações do sistema real pode descaracterizar a tecnologia que deu origem ao modelo.

Outra questão levantada na interação modelo-práticas é a da construção do modelo a partir das práticas existentes. Isso é uma necessidade na medida em que se busca um alto grau de representatividade da realidade no modelo. Modelos abstratos oriundos de outras situações produtivas, mesmo que legitimados serão limitados nessa representação. Por outro lado, a contraposição de modelos abstratos (o oriundo das práticas e o de práticas tidas como superiores) pode levar a um modelo institucionalizado de maior desempenho. No entanto, para que se consiga um grau maior da qualidade das previsões esperadas do modelo, é necessário que o analista de sistemas produtivos ganhe familiaridade com as especificidades do sistema real sob estudo para que possam ser acrescentados os detalhes ao modelo. Os processos (tecnologias de como fazer) existem nas empresas em duas formas: a) a formal, prescrita em manuais ou através da cultura da empresa e a) a sua forma real, como executada pelas pessoas no seu dia-a-dia. Modelar o prescrito levará a uma produção nominal e não à resultante das atividades realizadas.

A reusabilidade dos modelos de simulação depende não só das capacidades e flexibilidade dos *softwares* de simulação mas também dos resultados obtidos pela aplicação do modelo às práticas. As tecnologias contidas no modelo, ao serem aplicadas, poderão influir nas práticas e terão seus resultados avaliados pelo ambiente. Nessa avaliação o modelo será

questionado e surgirá a necessidade de alterar o modelo vigente. Nesse momento, é comum a indisponibilidade do analista de sistemas produtivos para a alteração do modelo conceitual e conseqüentemente do modelo de simulação. Além disso, os fatores a serem incorporados no modelo podem não ser facilmente representados, o que inviabiliza a sua incorporação. Isso implica em modelos de ocasião, criados e aplicáveis a apenas um ponto da linha temporal dos modelos organizacionais. Disso decorre a necessidade de que os modelos pertençam a quem os utiliza, ou seja, às empresas e não aos consultores. O uso continuado e iterativo do modelo como paradigma a ser questionado possibilitará às organizações o aumento continuado do conhecimento sobre o próprio sistema real, na medida em que haverá a atualização constante do modelo e a sua confrontação com o real. Dessa forma, espera-se que o sistema real seja constantemente questionado ("melhorado") e não somente em momentos em que todo o modelo tecnológico torna-se obsoleto ou inadequado.

Outro aspecto a ser discutido é o da **legitimidade de modelos**, que é almejada pela etapa da metodologia de simulação chamada de verificação e validação. A verificação determina se o modelo computacional corresponde ao modelo conceitual. Trata-se de uma etapa de desenvolvimento de programas computacionais e que deve utilizar técnicas da engenharia de *software* (BANKS, 1988). Por outro lado, a validação pretende determinar se o modelo corresponde à realidade modelada. Nessa etapa procura-se observar se os procedimentos, equipamentos e comportamento dos dispositivos de manuseio representados no modelo comportam-se como na realidade. A comparação se dá, em última análise, com base em parâmetros quantitativos tais como quantidade produzida, tamanho de fila, ociosidade e disponibilidade dos recursos. Na maioria dos casos, um modelo é considerado legítimo através de fatores legitimados no ambiente operacional e que, na sua grande maioria, estão relacionados a desempenho econômico.

A lógica de desempenho pode e deve ser questionada pelo analista de sistemas produtivos. Mais ainda, essa lógica vem sendo questionada pelas mudanças no ambiente, caracterizadas por mudanças institucionais. No caso do Brasil, isso pode ser exemplificado pela ação cada vez mais intensiva da fiscalização pública para cumprimento da Norma Regulamentadora-17 (1996) que trata de ergonomia. Outro exemplo é o da consideração de questões relativas ao ambiente natural como, por exemplo, as da ISO-14000. Isso também alerta para a necessidade de se questionar os modelos de determinação de arranjo físico, centrados basicamente no cálculo de fluxo de materiais (***Apêndice A***).

A incorporação de fatores de desempenho outros que não simplesmente econômicos, pode levar a um aumento da legitimidade dos modelos de simulação e a sua validação junto aos seus usuários no ambiente da empresa. No entanto, isso leva, novamente, à necessidade de incorporar no modelo novas tecnologias que implicam no aumento da complexidade bem como na necessidade de novas técnicas para modelagem em simulação. Por exemplo, a incorporação do impacto da atividade dos operadores sobre sua estrutura corpórea implica na necessidade de que os simuladores sejam capazes de representar tridimensionalmente os corpos do operador, os movimentos de seus membros, o consumo energético, o impacto esperado dos movimentos sobre os músculos. Pode-se presumir que as dificuldades para modelar as conseqüências psíquicas seriam ainda maiores.

Por outro lado, com a globalização e a alta atratividade dos mercados financeiros, há uma pressão sobre os gerentes por resultados econômicos e a justificação dos investimentos. Se por um lado é difícil incorporar tecnologias como análise de fatores ergonômicos nos modelos, torna-se importante relacioná-los com a lógica econômica das empresas. Isso exigirá uma série de estudos para desenvolvimento de índices adequados (ergonômicos, no exemplo) e que possam ser, de alguma forma, associados aos quesitos de desempenho econômico da produção.

4.4.2 A ação do analista de sistemas produtivos sobre o modelo conceitual

Quando se constrói os modelos deve-se questionar os elementos apresentados ao analista pois se pode incorrer no fenômeno do *enactment* (WEICK, 1979). O demandante do modelo ou o próprio analista, ao estabelecer as variáveis de ambiente às quais o sistema produtivo deve responder de forma adequada pode estar criando o próprio fenômeno, em outras palavras, as organizações produzem as situações às quais elas respondem. É claro que, em muitos casos, o analista não pode interferir na objetivação desses fatores, no entanto deve estar ciente, enquanto projetista, de que esse tipo de situação pode levar a uma solução não satisfatória. É comum que as organizações procurem ter um melhor desempenho através da incorporação de novas tecnologias, sendo a contratação de serviços e de pessoal capacitado uma das formas de se fazer isso. Esses profissionais, no entanto, estão em geral sob o paradigma corrente e estarão aportando à empresa uma série de conceitos legitimados pelo academicismo ou pelo mercado, dos quais a organização pode prescindir.

Outro aspecto do efeito da ação do analista de sistemas produtivos é o de que, ao alterar o sistema real através do modelo, ele estará modificando o comportamento dos elementos da prática que compuseram o seu modelo, o que poderá anular qualquer correspondência entre os resultados reais e os do modelo. Ou seja, o modelo ao ser implementado extinguirá total ou parcialmente o sistema real (práticas) que originou o próprio modelo. Um exemplo de como isso pode ocorrer é a consideração de que os recursos humanos se comportarão da forma prevista, mesmo que de forma variável. Esses humanos, para atender às metas estabelecidas pela organização e que foram prescritas através do novo modelo, desenvolvem estratégias individuais mentais e gestuais complexas novas. Em outras palavras, reagem ao modelo, alterando seus padrões pessoais de desempenho (atividade).

Deve-se ter claro que os desenvolvedores do modelo estarão interferindo no conjunto de tecnologias (intencionalmente e não intencionalmente), guiados pelos modelos de resolução de problemas colecionados ao longo de suas histórias pessoais. A modificação intencional da tecnologia é a do conjunto de tecnologias representadas no modelo, o que pode diminuir a representatividade do mesmo. No sistema real, outros elementos tecnológicos serão aplicados/desenvolvidos através da experiência pessoal e da prática dos implementadores que também se valem dos seus conhecimentos sobre as práticas. A modificação não-intencional do sistema real é conseqüência do que não está no modelo, do conjunto complementar às tecnologias manipuladas no modelo e que constituem a complexidade do real. Mesmo quando se considera a proposição do imperativo tecnológico de que haveria influência da *core technology* na estrutura social da organização quando uma tecnologia fosse predominante (PUGH et al. 1963), a modelagem dessa tecnologia pode ser insuficiente para representar, com o grau adequado de realismo, o quadro tecnológico real com vistas a aumentar a representatividade dos resultados do modelo frente aos resultados reais.

4.4.3 Modelos como indutores de mudanças

Outro aspecto do uso do modelo é o de justificar a adoção de uma determinada solução tecnológica. É comum o modelo de simulação ser usado como catalisador de um conflito de poderes e/ou interesses. Os índices de desempenho servem para refutar argumentos pouco estruturados ou de crenças (individuais ou culturais de uma organização) do grupo opositor. De maneira geral, isso ocorre na medida em que o índice é um referencial objetivo e estruturado que para ser questionado deve ter sua forma de avaliação questionada, o que acaba por estruturar os argumentos apresentados. Para os que estão habituados à lógica do desempenho da produção, os indicadores é que cumpririam o papel de convencer a parte

divergente. O poder de convencimento desses parâmetros está na legitimidade conferida atualmente ao modelo econômico da produção.

O analista de sistemas produtivos usa o modelo para embasar sua argumentação em favor de um projeto tecnológico desenvolvido total ou parcialmente por ele, e com o apoio dos defensores do projeto.

Do ponto de vista do projeto de engenharia, deve-se tomar cuidado para que não se use o modelo para justificar tecnologias danosas às pessoas que utilizam a tecnologia no real (direta ou indiretamente) e ao meio ambiente. Deve-se observar que essa última assertiva já demonstra a inclusão de novos elementos no modelo econômico da produção. O poder de influir na tecnologia em consideração é limitado para o analista, principalmente se for externo à organização. Nesse caso, esse poder deve ser estabelecido no momento do estabelecimento do contrato para execução (interno ou externo) do projeto.

A legitimidade do analista e a conferida ao modelo fazem com que o modelo tenha capacidade de se impor como solução válida. O modelo tem intrinsecamente uma credibilidade inquestionável pelo fato de estar associado à realidade que representa. Se o modelo se comporta como a realidade, tal qual o autor a conceba, é plausível que o modelo esteja certo. Esse apelo é tão forte que, em modeladores de simulação sem experiência, há uma tendência em aceitar um modelo tão logo ele funcione no simulador. Felizmente em muitos casos isso termina quando os resultados apresentam-se muito diferentes do sistema real.

Contudo, o conflito existe, seja ele preexistente ao modelo ou em decorrência dele. É comum que nas apresentações dos resultados ou do próprio modelo, aspectos menos entendidos e que estejam desestruturados sejam motivo de discórdia mesmo que sejam verificáveis diretamente no sistema real. Um modelo pode ter a sua validade questionada se

demonstrar que o gargalo de um processo esteja em uma máquina simples e não, como esperado, em uma máquina de processo demorado. O que faz parte do dia-a-dia e que pode ser dedutível de forma fácil a partir dos conhecimentos sobre o sistema é mais facilmente aceito pelos decisores. Além disso, o grau de obviedade de uma característica evidenciada pelo modelo depende do ator envolvido.

O modelo torna-se útil justamente nesse momento onde, através da estruturação do problema (fornecida pela metodologia de modelagem) e da mediação do analista, decisões possam ser tomadas em bases mais objetivas.

4.5 A teoria geral dos sistemas revisitada

A lógica modernista de organização da produção em que há a divisão entre planejamento e execução das operações, a busca da melhor maneira de se produzir e a predominância do modelo econômico da produção caracterizam a simulação de sistemas atualmente. A principal influência é a da Teoria Geral dos Sistemas, proposta pelo biofisiologista alemão Ludwig von Bertalanffy na década de 1950, época do surgimento da simulação. É também da Teoria Geral dos Sistemas que a simulação tira seus jargões. Atualmente a simulação consegue modelar satisfatoriamente sistemas produtivos dos mais variados setores. No entanto, devido aos limites das técnicas e ferramentas desenvolvidas até aqui, a simulação não consegue ainda o objetivo proposto para a Teoria Geral dos Sistemas: a capacidade de representar quaisquer sistemas. Um exemplo desse limite é o da representação da inteligência humana nos modelos, que apesar dos avanços das técnicas de Inteligência Artificial, está aquém da capacidade humana.

A observação da Teoria da Contingência (HATCH, 1996) de que organizações diferem consideravelmente entre si dependendo se elas operam em ambientes estáveis ou que mudam constantemente demonstra um outro aspecto a ser analisado com cuidado. Modelos podem ser construídos de tal forma que se tornem determinísticos, com comportamento semelhante ao de uma máquina. Tanto esses modelos quanto as organizações assim são chamados de **mecanísticos**.

Por outro lado, a justificativa para o uso da simulação de sistemas hoje em dia se dá entre outros fatores, pela idéia que as organizações precisam de flexibilidade, que os empregados devem ser encorajados a aplicar as suas habilidades para que a organização se ajuste às mudanças dos padrões. Essas organizações são classificadas como **orgânicas** que têm menos especialização e são menos formalizadas e hierarquizadas do que as mecanísticas. Elas também têm consideravelmente mais comunicação lateral (HATCH, op. cit.). Daí a justificação da utilização da simulação (surgida da concepção da TGS) em ambientes dinâmicos, sujeitos a mudanças e abertos.

No entanto, ao observarmos a tecnologia de simulação atual verificamos que o fator que a torna mais poderosa, a sua capacidade de representação dos processos da organização, é uma das áreas que precisa evoluir mais intensamente. A representação de sistemas baseados em processos repetitivos é razoavelmente simples com as ferramentas existentes hoje. Pode-se argumentar que a utilização de distribuições estatísticas para representar a variabilidade do sistema já é suficiente. No entanto, mesmo que se utilize esse recurso, os resultados produtivos estão variando mas não a lógica (os procedimentos, a tomada de decisões). Há dificuldade de modelar questões como objetivos conflitantes, incerteza quanto ao ambiente, competição entre os agentes modelados, sabotagem, etc.

Se por um lado a complexidade dos modelos tende a aumentar, a tecnologia de simulação deve evoluir. Como apresentado, a construção de modelos de simulação se dá em

meio a uma série de limitantes: (1) cognição (individuais e de manipulação do conhecimento); (2) dinheiro/tempo; (3) capacidade de modelagem do *software*; (4) capacidade de modelagem da tecnologia de simulação.

Para tratar de questões como a variabilidade da produção, modelos demasiadamente abstratos não são os ideais pois os elementos que manifestam (representam) e os que causam a variabilidade não estão geralmente modelados.

Finalmente conclui-se que o uso de modelos de simulação não constitui um fim em si mesmo, mas um meio para que os conflitos entre os modelos tecnológicos e os condicionantes ambientais (econômico, sociais e culturais) possam ser objetivados e que os decisores possam tomar decisões de melhor qualidade.

5 PROPOSIÇÃO DE UM FORMALISMO PARA MODELAGEM E ANÁLISE DE ARRANJO FÍSICO

O foco principal deste trabalho foi estabelecer um formalismo baseado em entidades e relacionamentos para estruturar modelos integrados para o desenvolvimento e análise de arranjo físico. Este é o ponto de articulação fundamental. A partir do estabelecimento de uma forma coerente para tratar as especificidades do arranjo físico é que poderão ser definidas as formas de aplicação dos demais elementos componentes do programa computacional, como tipo de interface, formas de cálculo etc. Esses elementos serão escolhidos pelo desenvolvedor de acordo com as suas necessidades e possibilidades.

Por *formalismo* entende-se uma meta-estrutura para a organização conceitual dos componentes de *software* a serem desenvolvidos. Espera-se que o desenvolvedor do *software*, ao utilizar-se do formalismo, consiga que as funções implementadas computacionalmente mantenham entre si a coerência necessária para apoiar o grupo de projeto em suas atividades. O formalismo não estabelece *a priori* as classes que comporão o sistema computacional. Cada componente do formalismo pode ser implementado computacionalmente por uma ou mais classes definidas pelo desenvolvedor.

A seguir são apresentadas as idéias que definem o formalismo para o desenvolvimento de programas computacionais para arranjo físico.

5.1 Concepção do formalismo relacional

O ponto de partida para a concepção do formalismo é facilitar a interação dos participantes da equipe de projeto com ferramentas computacionais de arranjo físico. A forma natural como os gabaritos eram manipulados antigamente se perdeu com o advento dos computadores. Entretanto, com o surgimento das tecnologias de realidade virtual já é possível projetar interfaces mais amigáveis com o usuário para o projeto de arranjo físico. Essa possibilidade, no entanto, deve ser explorada de uma maneira estruturada, incorporando os elementos fundamentais dos programas para projetos de arranjo físico.

Nesse sentido, há um rompimento com a concepção dos programas tradicionais para arranjo físico que possuem um caráter prescritivo ao apresentarem uma única solução ao usuário como sendo a *ótima*. Os *sofwares* assumem o papel de ferramentas computacionais para desenvolvimento, manutenção e análise de modelos de arranjo físico. Idealmente, em última análise, as ferramentas computacionais devem ser modelos dos sistemas reais, oferecendo ao usuário mínimas dificuldade de uso das suas interfaces. Como modelos, não devem limitar as possibilidades, antes devem servir como artefatos de exploração epistêmica e pragmática como na teoria da regulação da ação (Hacker, 1994). Como afirma LÉVY(2005), “um modelo não é nem verdadeiro nem falso. Sua utilidade será medida em relação a um determinado objetivo específico”. O modelo deve descrever o sistema sob estudo de maneira que as pessoas possam entendê-lo e modificá-lo facilmente à luz de seus objetivos específicos.

Em virtude da existência de pontos de vistas diversos sobre os fatores condicionantes das soluções de arranjo físico, praticamente todo participante tem uma sugestão de solução, pelo menos parcialmente articulada. Em oposição à visão da solução única final dos *softwares* tradicionais, apresenta-se um novo quadro onde várias soluções

coexistem e disputam entre si a oportunidade de se manifestar na solução que será aquela acordada pelos participantes da equipe de projeto. Possuir um programa computacional flexível e expansível o suficiente para acomodar as necessidades do grupo de projeto é essencial nesse caso. Essas características também são importantes, na medida em que os condicionantes e fatores decisivos para a determinação do arranjo variam também de acordo com a natureza do sistema sob estudo. Como afirmou MUTHER (1976, p. 10-1), "a representação inadequada pode dificultar a escolha entre as alternativas geradas".

A partir do modelo de interação entre os participantes das equipes de projeto de arranjo físico mostrada na ***Figura 1-2*** foi desenvolvida a concepção do formalismo, mostrada na ***Figura 5-1***.

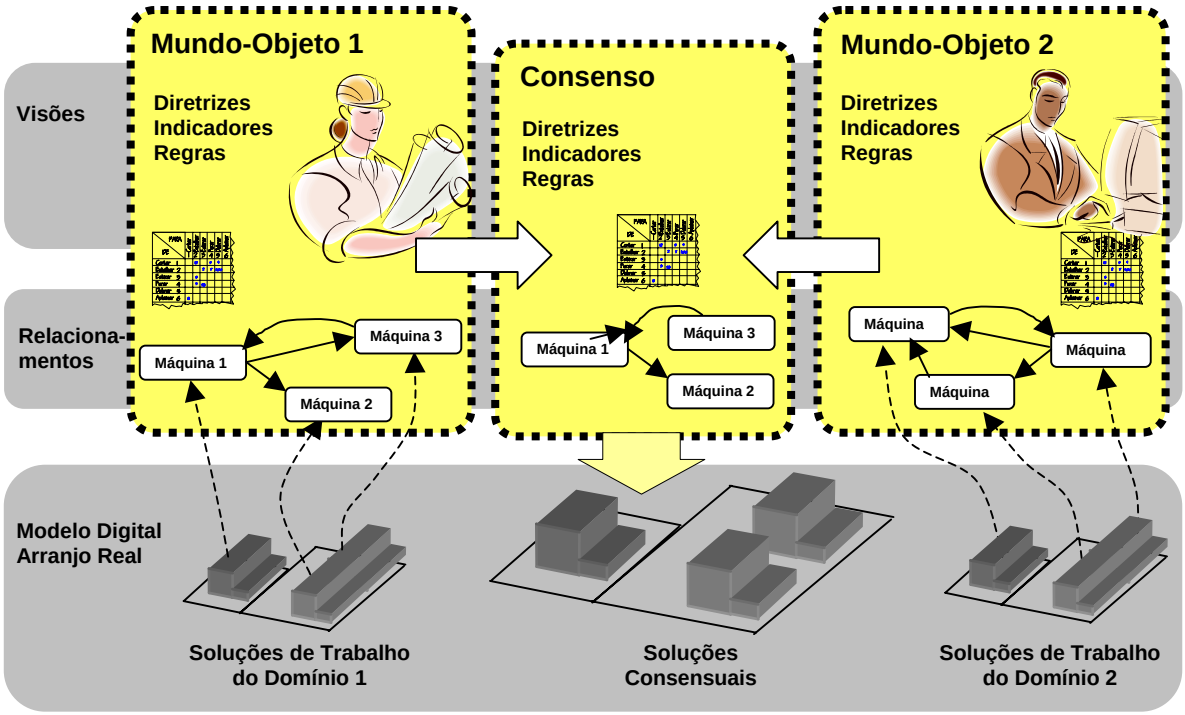


Figura 5-1: ***Concepção do formalismo relacional***

5.1.1 Modelo digital do arranjo real

São representações icônicas digitais mantidas pelo programa que implementa o formalismo. Cada participante do processo de projeto idealmente pode desenvolver suas próprias soluções de trabalho que podem contribuir para uma solução consensual. Essa

manipulação pode ocorrer das duas maneiras apontadas por HACKER(1994): a) uma alteração proposital, decorrente de uma tarefa definida ou (b) uma alteração exploratória, epistêmica, onde o criador da solução explora as formas e o espaço em busca de novas possibilidades de arranjar os objetos. Uma vez que as tenha encontrado, o participante pode apresentá-las para apreciação do grupo que pode rejeitá-las ou aceitá-las, total ou parcialmente. As soluções individuais podem ser construídas a partir do nada ou podem ser criadas através de modificações de soluções preexistentes.

A implementação computacional desse elemento conceitual do formalismo pode ser feita com várias tecnologias computacionais gráficas disponíveis atualmente como OpenCASCADE (2007), OpenInventor (WERNECKE, 1994a), OpenSceneGraph(2007) entre outras. Essas bibliotecas implementam classes capazes de manter e exibir representações gráficas de objetos tridimensionais necessárias para representar objetos concretos como máquinas e equipamentos entre outros. A implementação computacional deve permitir que os objetos possam ser movidos facilmente para que os usuários possam criar uma ou mais soluções de arranjo físico que poderão ser comparadas com as soluções dos demais participantes.

5.1.2 Relacionamentos

Os relacionamentos descrevem de forma estruturada as interações entre objetos considerados nos modelos de arranjo físico. Esse elemento do formalismo representa todas as relações que podem ser estabelecidas entre dois ou mais objetos do arranjo.

Independentemente do modo de geração, é importante e desejável que os motivos das ações de modificação sejam registradas no próprio modelo. Esse registro servirá para o próprio criador rever suas ações sobre uma determinada alternativa e para balizar alterações propostas por outros participantes. Durante o processo de descobrimento da

natureza e dos detalhes dos problemas, o embate com o real, o usuário estrutura seu conhecimento sobre o problema estabelecendo relações entre os objetos. No tocante ao problema do arranjo físico essas relações podem ser de causa, de seqüência, de transferência de materiais, informações ou pessoas, de passagem de tempo, de proximidade. Ao preencher uma Carta de Relações Preferenciais, por exemplo, o participante explicita e estrutura como deve ser a proximidade entre as áreas de atividade e o porquê disso.

A implementação computacional dos relacionamentos pode ser feita usando-se a estrutura de dados dos grafos, como apresentado na seção 3.3.4. Com isso, obtém-se a flexibilidade desejada para representar as relações que eventualmente o usuário do *software* deseje incluir no modelo e que não sejam as tradicionais.

5.1.3 Mundo-objeto

Um mundo-objeto compreende um conjunto de objetivos, condicionantes e ferramentas de análise usadas de forma articulada (ou não) por um ou mais participantes do grupo de projeto que compartilhem uma série de conhecimentos. Esse elemento conceitual do formalismo foi inspirado no conceito mundo-objeto, conforme conceituado por Bucciarelli (1998, 2004).

Esse mundo-objeto a ser implementado computacionalmente é na verdade uma representação de parte do mundo-objeto participante do processo de projeto. É implementado no programa computacional pelas pessoas participantes daquele mundo-objeto através das funções disponibilizadas pelo programa computacional.

Computacionalmente cada mundo-objeto possui métodos específicos que podem ser aplicados às soluções de arranjo criadas por ele, procurando atingir os *Objetivos* explicitados e registrados, seguindo as *Diretrizes*, também explicitadas e registradas.

5.1.4 Visões

Representam um conjunto vigente de crenças e valores individuais que definem cenários de direcionamento das soluções e para a sua avaliação. Essas crenças podem ser coincidentes entre os mundos-objetos que participam do projeto, o que pode fazer com que sejam consideradas como consenso.

5.1.5 Consenso

É um mundo-objeto formado por elementos oriundos dos demais mundos-objetos e legitimados pelo grupo.

A formação do consenso conforme a concepção proposta se dá através da negociação entre as partes em torno de quais elementos são, *a priori*, considerados como válidos por todos. Esses condicionantes podem ser retirados inalterados dos mundos-objetos participantes, modificados ou criados. O conjunto inicial de consenso pode ser alterado à medida que o projeto avança em função de especificidades das novas etapas em cumprimento ou de novas descobertas sobre o real. Do ponto de vista da execução do projeto, a existência do consenso é essencial para que os executores saibam quais são os critérios que avaliarão suas ações e os resultados delas. No entanto, do ponto de vista de registro da riqueza do processo de geração de soluções, isso pode ser um fator limitante.

A geração de modelos consensuais quando há assimetria de poder entre os participantes pode levar a uma situação onde condicionantes e relações importantes não sejam explicitadas. Se, além disso, o processo de registro das informações é único, há perda da qualidade da informação, pois se registra apenas a solução final e não o processo de discussão. A possibilidade de registrar de forma integrada as diversas visões sobre o mesmo problema, mantém registrada mesmo de que maneira implícita as questões importantes relacionadas ao projeto. Essas questões devem ser revisadas, pois podem voltar a surgir em

etapas posteriores do projeto ou após a implantação, quando os custos de mitigação de eventuais efeitos indesejados serão maiores.

Apesar da necessidade da existência do consenso, uma questão importante é permitir que as pessoas vejam no programa computacional um espaço pessoal de trabalho, onde possam fazer experimentações baseadas em suas idéias e intuições. PUGH (1991) afirma que a geração individual de idéias em uma estrutura participativa de projetos produz melhores resultados e que uma vez geradas as soluções elas têm que ser avaliadas pelo grupo. Como a negociação é parte integrante do processo participativo, as soluções geradas no espaço individual devem poder dialogar com as soluções dos demais participantes. Esse processo de diálogo entre as soluções individuais deve ser constante, uma vez que as alternativas estão sendo alteradas a todo momento à medida que o projeto avança. Assim, as soluções geradas no espaço individual devem poder ser comparadas entre si. Dessa comparação, os participantes desenvolverão novas percepções a respeito do arranjo e das instalações trazidos pelos mundos-objetos complementares. Além disso, essa comparação pode levar a descobertas sobre o real, o que pode contribuir para o aperfeiçoamento das soluções individuais, da solução consensual e até mesmo a mudanças dos mundos-objetos.

5.2 Descrição de um formalismo para análise de arranjo físico

A seguir é apresentado uma ontologia para estruturar a análise de soluções de arranjo físico segundo a visão apresentada anteriormente. Uma ontologia, em seu sentido amplo, é uma descrição das entidades, predicados e interações de uma dada área de conhecimento. No contexto do formalismo desenvolvido, ontologia refere-se ao conjunto de objetos conceituais, seus atributos e relações que o formam. Para representar essa ontologia serão utilizados os símbolos gráficos de uma linguagem de descrição de sistemas

computacionais chamada de UML, *Unified Modeling Language*, desenvolvida principalmente a partir da década de 1990 por Grady Booch, James Rumbaugh e Ivar Jacobson (BOOCH at al., 2005). O subconjunto utilizado será especialmente o diagrama de classes já que os elementos do formalismo serão representados computacionalmente por classes. Assim, por exemplo, um objeto a ser manipulado no arranjo físico será da classe *Objeto*.

A ***Figura 5-2*** mostra uma classe representada em UML. Classes possuem basicamente os atributos que as caracterizam e as ações que executam ou invocam, chamadas de métodos. As classes que são filhas de outra podem herdar os atributos e os métodos da classe-mãe.

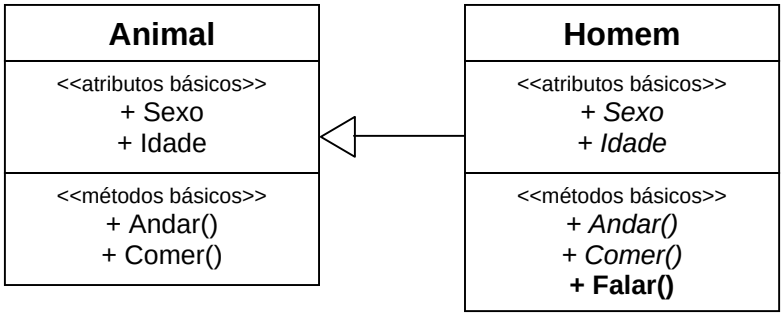


Figura 5-2: Exemplo de classes em UML.

No exemplo, a classe *Homem* possui os métodos *Andar()* e *Comer()* comuns aos membros da classe *Animal*. No entanto, somente objetos da classe *Homem* possuem o método *Falar()*. A seta mostrada na ***Figura 5-2*** indica que *Homem* é um *Animal* e, portanto, tem os mesmos atributos que a sua classe-mãe.

5.2.1 Mundos-objetos

O problema de arranjo físico consiste na organização espacial dos recursos de produção. Em um processo de projeto participativo, isso implica na colaboração e confrontação de várias visões semi-articuladas de realidade, os mundos-objetos (***Figura 5-3***).

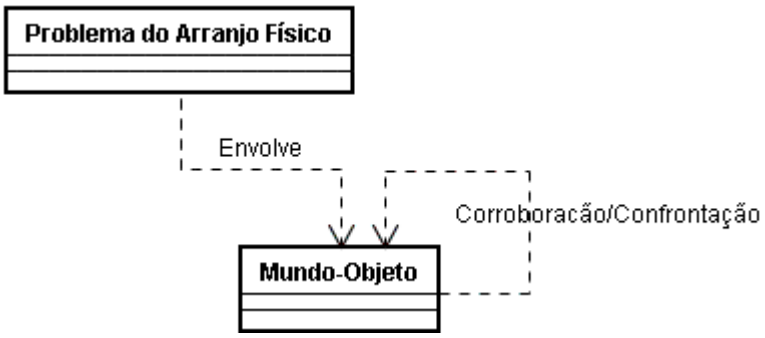


Figura 5-3: O problema de arranjo físico envolve mundos-objetos que estabelecem entre si relações de corroboração e confrontação

Cada indivíduo participante do projeto possui crenças e valores implícitos e explícitos que interferem no momento da geração das alternativas de arranjo fisico. Esses elementos podem se manifestar objetivamente no embate com o real no momento em que o projetista cria alternativas de arranjo fisico. Para caracterizar os mundos-objetos no que se refere às soluções de arranjo físico são atribuídos a cada mundo-objeto o seguinte conjunto de objetos:

(a) **Diretrizes:** são explicitações gerais que orientam o usuário no momento da criação dos arranjos. As diretrizes são as idéias gerais que o usuário deseja seguir e que podem entrar em conflito com outras diretrizes de outros mundos-objetos. Diretrizes podem se referir a várias áreas como logística, saúde e segurança do trabalho, forma geral dos arranjos, entre outras. Exemplos dessas diretrizes são: garantir conforto ambiental, aumentar segurança dos trabalhadores, procurar manter os fluxos alinhados em uma certa direção etc.

(b) **Indicadores:** são índices computáveis ou diretamente atribuíveis que têm validade em cada mundo-objeto e que servem para apontar para os participantes daquele mundo-objeto qual o grau de adequação de uma determinada solução. Espera-se que os indicadores tenham um certo grau de coerência mas isso não é obrigatório. Assim, por exemplo, espera-se que em um mundo-objeto em que há predomínio de conhecimentos de logística os

indicadores tenham origem em conhecimentos logísticos. Os indicadores podem ou não estar associados a diretrizes.

(c) **Métricas:** quando os indicadores são computáveis a partir de outros valores, podem ser associados a eles elementos que irão calcular seu valor em determinada alternativa. Esse elemento de computação de valores é chamado de métrica.

(d) **Regras:** são determinações específicas que são aplicadas no âmbito de cada mundo-objeto. As regras podem ser usadas para vários objetivos, entre eles:

- **Indicar que algo não possa acontecer.** Ex: a) Se a Máquina1 estiver no arranjo fisico é impossível usar o sistema de gás.
- **Indicar novas necessidades.** Ex: Se a potência total instalada for maior do que 1kVA, instalar outro transformador.
- **Sugerir ações.** Ex: Se custo total for maior do que 100 mil consultar o departamento financeiro.
- **Alterar diretrizes.** Ex: Se Número de máquinas for maior do que 3, garantir o conforto ambiental é difícil.
- **Alterar indicadores.** Ex: Se a quantidade de pedidos dobrar o número de pedidos em atraso aumentará 30%
- **Alterar outras regras.** Ex: Se a demanda for baixa, anular o mecanismo de contratação de terceiros.

(e) **Condicionantes**: regras, diretrizes e indicadores aplicáveis ao mundo-objeto em questão. Por exemplo, um arranjo em que haja uma linha automatizada pode ter indicadores relacionados a ela e que não estão presentes em outros arranjos em que a linha não está presente.

(f) **Arranjo:** um usuário pode criar várias alternativas de arranjo sob um mesmo conjunto de diretrizes, indicadores e regras. Uma alternativa é descrita pelo estado de condicionantes (critérios, diretrizes e regras) e da disposição espacial dos elementos do arranjo. Apesar disso, uma alternativa pode ser gerada ao acaso ou mesmo sob uma lógica que procura contrariar todos os condicionantes vigentes.

(g) **Comentários e Anotações:** no processo de criação do arranjo várias anotações e esboços são usados para documentar as ações tomadas ou para auxiliar o processo de geração de alternativas. Esses elementos documentam

de forma livre/desestruturada o modelo. São mensagens para usuários do modelo ou simplesmente resultado do processo de criação de soluções.

Ao incorporarmos os elementos discutidos até o momento temos a ontologia mostrada na ***Figura 5-4***.

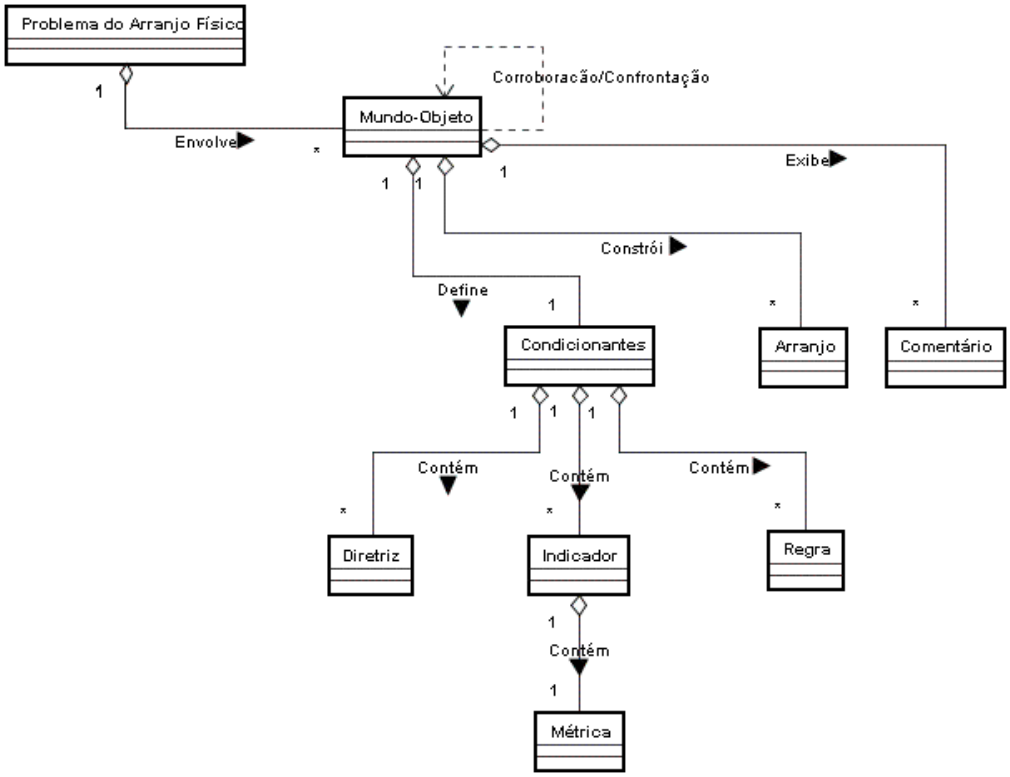


Figura 5-4: As soluções de arranjo físico são criadas sob a ação de condicionantes.

Assim, temos o estado mostrado na ***Figura 5-5***. Nessa figura a seta que liga *Mundo-Objeto-Consensual* indica que esse objeto herda as características do objeto *Mundo-Objeto*.

Ao observarmos os elementos apresentados para descrever os mundos-objetos percebe-se que eles existem também no âmbito do problema do arranjo físico, uma vez que durante o desenvolvimento do arranjo físico ou mesmo no início são estabelecidos consensos com relação aos condicionantes. Esses elementos consensuais podem ser representados por um ***Mundo-Objeto-Consensual*** derivado diretamente do conceito de *Mundo-Objeto*. *Mundo-*

Objeto-Consensual pode conter alternativas geradas coletivamente ou apenas os condicionantes consensuais. Além das alternativas, durante o processo de discussão de alternativas, o *Mundo-Objeto-Consensual* recebe os elementos comuns dos demais mundos-objetos, como a regras, as diretrizes e indicadores acordadas entre os participantes do projeto.

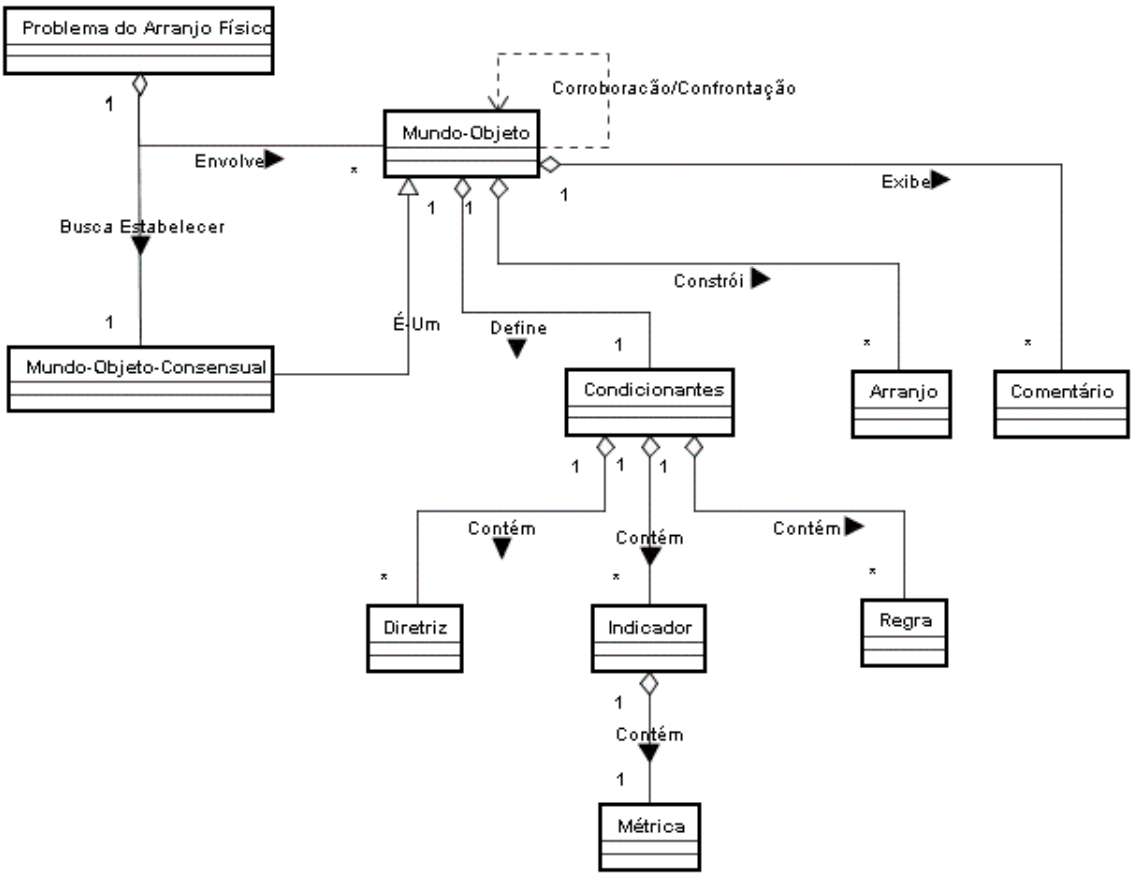


Figura 5-5: Pode surgir no problema do arranjo físico um mundo-objeto consensual

5.2.2 Arranjos

Os arranjos representam as alternativas geradas pelos membros de um determinado mundo-objeto respeitando ou confrontando os seus condicionantes. Na ontologia proposta os arranjos são formados a partir de objetos e relações:

(a) *Objetos* representam os elementos que são manipulados pelos participantes do mundo-objeto e que participam da solução. Podem ser objetos concretos (como uma *Máquina*, *Equipamento* e *Pessoa*) ou abstratos (como uma *Área* ou *Setor*). Em princípio, os objetos abstratos não possuem uma representação tridimensional, destinada aos objetos concretos.

(b) *Relações* são interações estabelecidas entre os objetos. Basicamente dividem-se em *Relação-Qualitativa* e *Relação-Quantitativa*.

(c) *Relacionamentos:* são conjuntos de relações. Os relacionamentos podem ser implementados computacionalmente como grafos e servem para gerenciar um conjunto de relações de um determinado tipo como fluxos de materiais, proximidade e outros.

Além desses componentes, outros que determinam um *Arranjo* são os *Atributos*. Esses elementos descrevem características qualitativas e quantitativas atribuídas ao *Arranjo*, *Objetos* e *Relações* entre outros. Exemplo desses atributos são: *Custo-Total*, *Investimento-Inicial* etc. Da mesma forma que os arranjos possuem atributos, os objetos e as relações também os possuem. *Atributos* são *Valores* e, portanto, podem sofrer restrição de valores (***Figura 5-6***). As *Restrições-de-Valor* limitam os valores de atributos a um conjunto de valores válidos, seja uma lista, seja um intervalo.

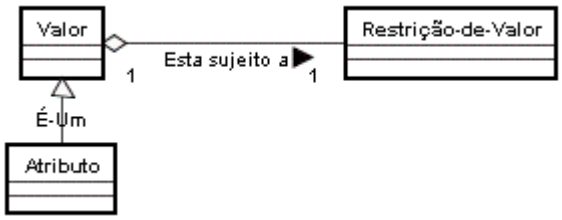


Figura 5-6: Atributos são valores qualitativos ou quantitativos que podem estar sujeitos a restrições de valor

Dessa forma, *Arranjo* pode ser definido como mostrado na ***Figura 5-7***. Observe que *Condicionantes* refere-se ao mesmo objeto mostrado na ***Figura 5-5***. Deve ser observado também que um objeto pode conter outros objetos. Assim, objetos complexos podem ser modelados facilmente.

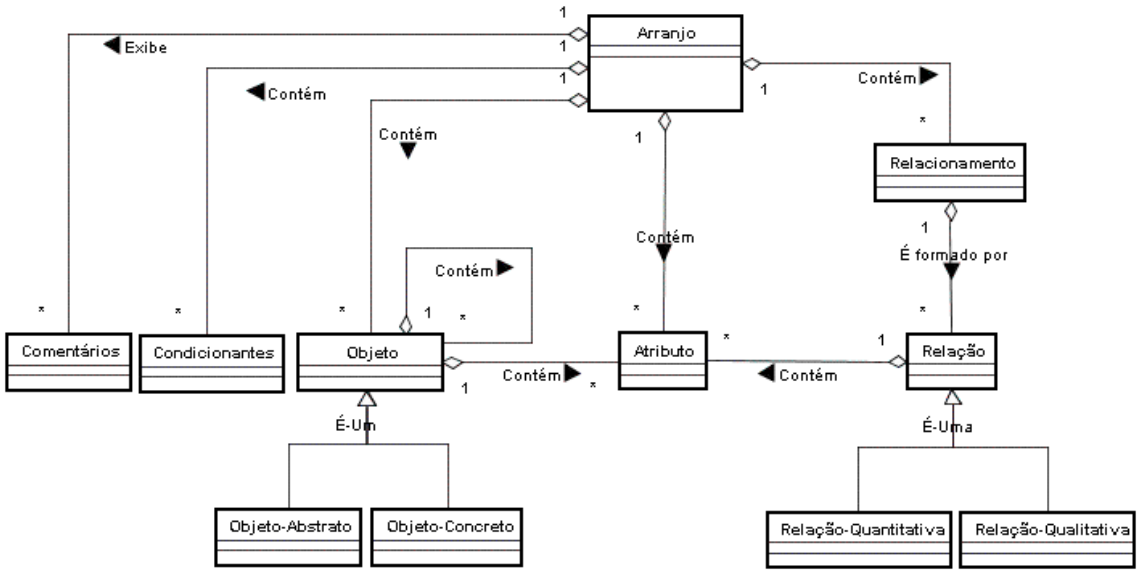


Figura 5-7: Caracterização de um Arranjo

Como mostrado na ***Figura 5-8***, os fluxos de materiais, a Carta De-Para, a Carta de Relações Preferenciais e o Mapa de Fluxo de Valor são modelados como classes filhas da classe *Relacionamento*.

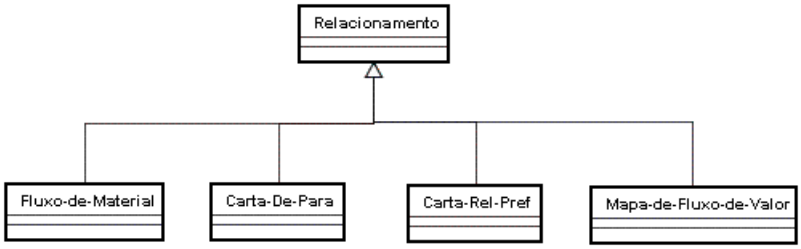


Figura 5-8: Um relacionamento pode modelar várias ferramentas de arranjo físico.

Com as vantagens de derivação de classes oferecidas pela programação orientada a objetos (POO) é possível derivar classes de outros tipos de relacionamento sem ser necessário alterar as demais classes . Assim, por exemplo, a classe *Mapa-de-Fluxo-de-*

Valor pode implementar métodos para gerenciar as suas demais características como os fluxos de informações e as indicações visuais de mudança entre outros.

5.3 Utilização do formalismo para o desenvolvimento de programas computacionais para o projeto de arranjo físico industrial

5.3.1 Etapas do desenvolvimento do protótipo

Como exemplo da aplicação do formalismo, são apresentados a seguir os passos para a criação de um protótipo computacional para o projeto de arranjo físico.

5.3.1.1 Etapa 1: Criação do conceito do protótipo

Foram definidas as características do protótipo e como ele implantaria os elementos do formalismo. Nessa etapa foi criada uma ilustração de como seria a interface (***Figura 5-9***). O **QUADRO 13** a seguir mostra algumas das tarefas e as soluções que foram definidas.

Tarefa	Solução
Permitir a visualização e edição dos atributos dos objetos	Implementar uma vista com a lista de atributos. Ao clicar sobre os objetos, os seus atributos são automaticamente exibidos.
Exibir para o usuário um conjunto de objetos, discriminando seus atributos preexistentes e sua representação icônica	Implementar uma biblioteca com os objetos. Basta ao usuário selecionar o objeto desejado e inseri-lo no modelo.
Exibir e permitir a edição de modelos relacionais	Implementar uma vista de relacionamentos com essas funções
Exibir e permitir a edição do arranjo através da manipulação direta dos objetos.	Implementar uma vista que seja capaz de exibir modelos tridimensionais e que permita manipulá-los diretamente.

QUADRO 13: Algumas das tarefas e as soluções apontadas durante a etapa de planejamento do protótipo.

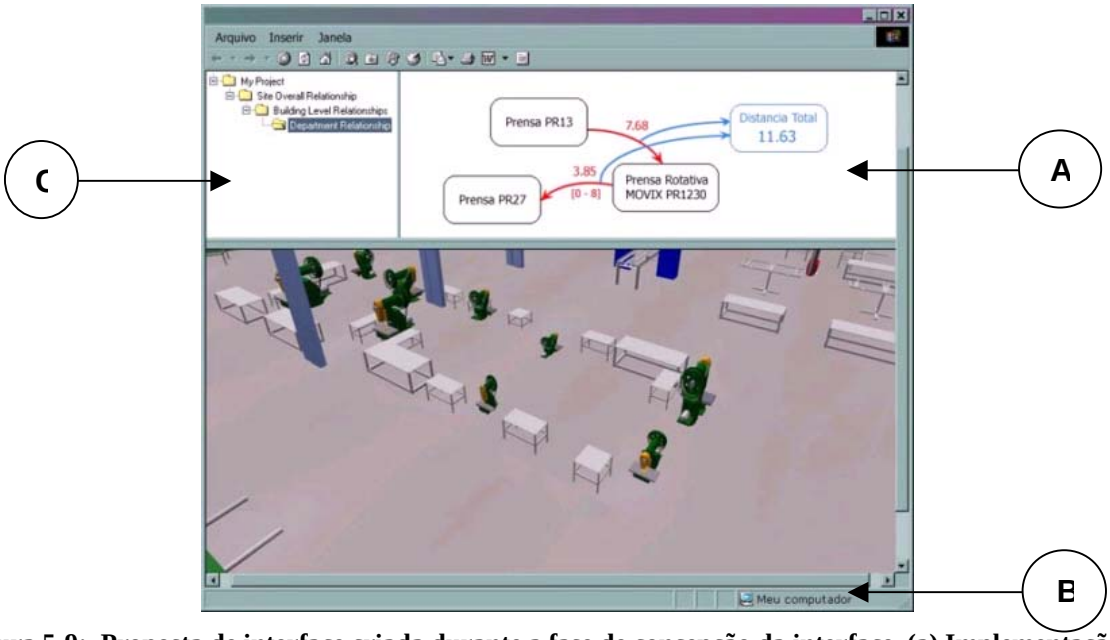


Figura 5-9: Proposta de interface criada durante a fase de concepção da interface. (a) Implementação do modelo de relacionamentos como um grafo através de ícones; (b) Modelo digital tridimensional dos elementos concretos do chão-de-fábrica; (c) Hierarquia

5.3.1.2 Etapa 2: Criação de um projeto com a interface básica do programa

Foram criadas as vistas necessárias para o protótipo no programa. Isso implicou na criação de classes na linguagem C++ (DEITEL & DEITEL, 2004) e sua implementação de acordo com as classes disponíveis no compilador usado. Foi necessário a criação de classes para controlar o aplicativo e cada uma das vistas: do modelo tridimensional, do modelo relacional, da biblioteca e comandos, entre outras. Por exemplo, em uma implementação no compilador Microsoft Visual C++ (KRUGLINSKI et al., 1998) para que os objetos sejam desenhados e apareçam na vista de relações é usada uma classe padrão chamada *CView*. Essa classe fornece também acesso às rotinas de interação com o *mouse* e teclado necessárias para permitir que o usuário altere a disposição dos blocos. Essas classes como são específicas do sistema adotado não serão apresentadas neste trabalho.

5.3.1.3 Etapa 3: Implementação das classes específicas para representação do arranjo físico de acordo com o formalismo

O formalismo define um conjunto dos principais objetos necessários para implementar a visão proposta para programas computacionais de arranjo físico. Também define a forma como eles se relacionam. A partir disso e considerando como forma de implementação a programação orientada a objetos, cada objeto descrito é convertido em uma classe em uma linguagem de programação como Java ou C++, como exemplificado na ***Figura 5-10***.

Na ***Figura 5-10*** a classe *Atributo* foi implementada em C++. Os atributos básicos *Nome* e *Valor* são implementados computacionalmente como cadeias de caracteres e por isso são do tipo *CString*. O atributo *Valor* é do tipo protegido o que impede a sua alteração direta, como no caso do atributo *Nome* que é público. Para alterar *Valor* ou recuperar seu valor são usados dois métodos: *DefinirValor()* e *ObterValor()*. Essa capacidade de proteção de dados é uma das características do chamado *encapsulamento*.

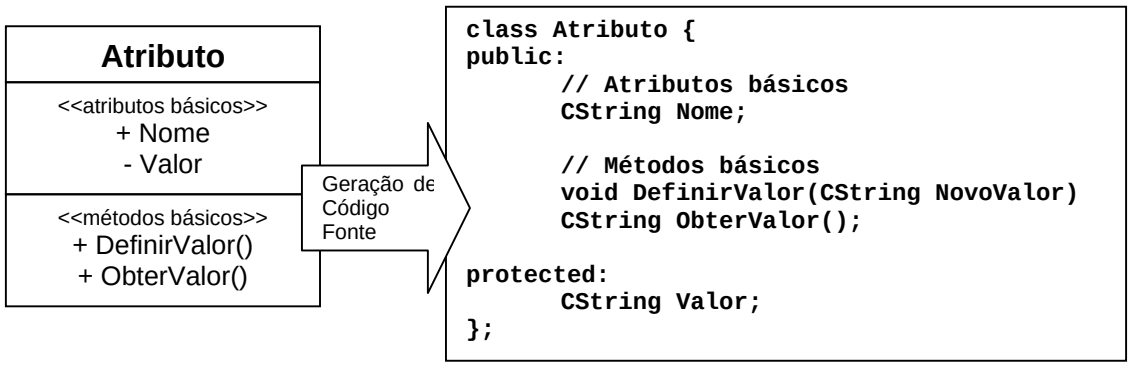


Figura 5-10: Geração de programas a partir da especificação da classe em UML.

Os detalhes sobre o protótipo implementado são apresentados na seção 5.4.2.

5.3.1.4 Etapa 4: Refinamento da implementação e correções

Nessa etapa os elementos do formalismo foram refinados o que implicou em pequenas alterações na forma de relacionamento de alguns elementos do formalismo. Nessa etapa o

objetivo foi obter um protótipo funcional, o que implicou em vários testes e compilações para determinar a forma mais adequada para implementar o formalismo.

5.3.1.5 Etapa 5: Teste do protótipo com outro tipo de interface

Nessa etapa o protótipo foi usado com um quadro branco sensível ao toque em substituição à manipulação com o *mouse*. Os detalhes serão apresentados na seção 5.5.

5.3.2 Implementação do protótipo

O protótipo foi implementado em ambiente Windows, usando-se a linguagem C++ e está mostrado na ***Figura 5-11***. Os componentes implementados foram os seguintes:

- *Uma biblioteca de objetos* – composta de vários arquivos em formato XML(W3, 2007) e que podem ser partilhados entre os vários usuários do sistema. A XML, *eXtendable Markup Language*, é uma linguagem parecida com a linguagem HTML, *Hypertext Markup Language (W3, 2006)*, usada para confecção de páginas da Internet e que permite a criação de suas próprias marcações (*tags*);
- *Uma estrutura em forma de árvore* – mostra como os objetos estão organizados hierarquicamente entre si;
- *Uma vista com as relações entre os objetos* – permite que sejam criadas as relações e que os objetos sejam manipulados na forma de diagramas;
- *Uma vista tridimensional* – permite que o arranjo seja visto e manipulado com uma aparência mais próxima dos objetos do mundo real;
- *Uma interface de comandos* – permite que o usuário acesse diretamente o sistema especialista e que possa executar outros comandos porventura implementados no sistema;
- *Uma biblioteca de ícones* – permite que os símbolos usados nos diagramas de relacionamento sejam alterados.

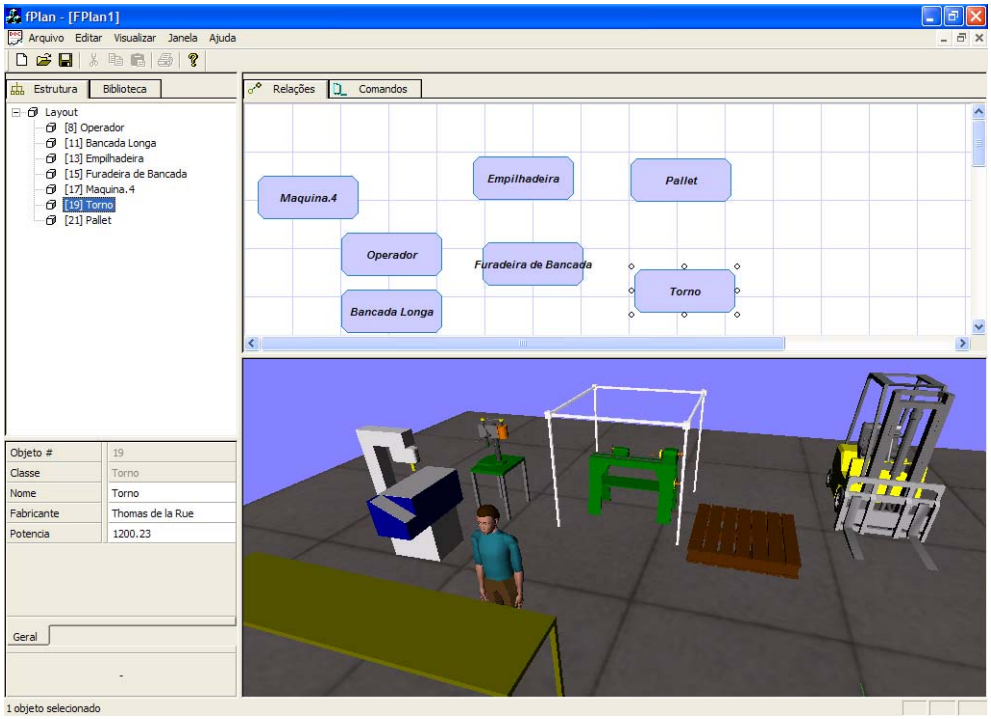


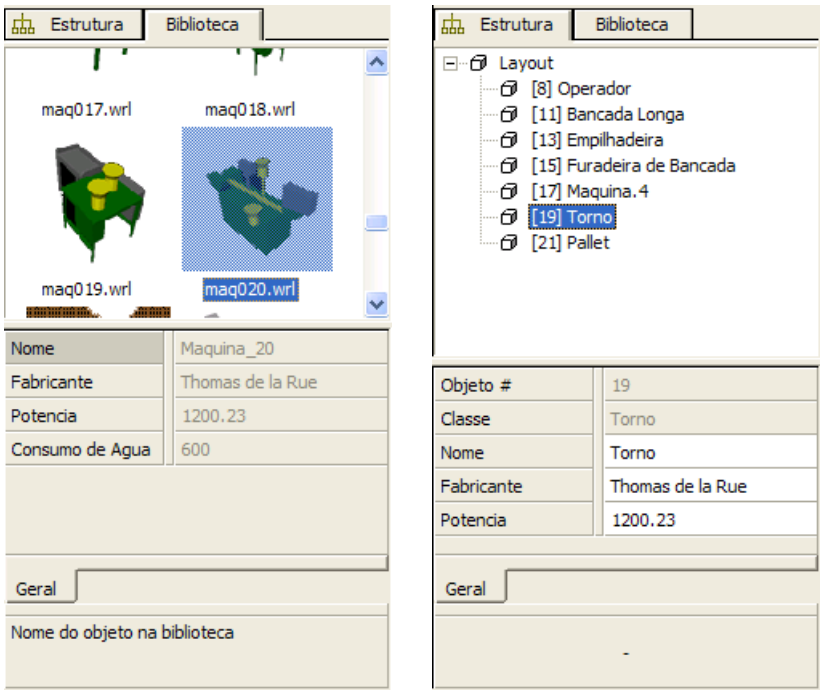
Figura 5-11: Vista geral do protótipo implementado computacionalmente.

5.3.2.1 Os objetos e suas propriedades

O ponto de partida para a implementação do sistema para desenvolvimento de arranjo físico é o objeto e sua representação. O sistema de desenvolvimento de arranjo físico deve permitir que eles sejam manipulados e que suas propriedades possam ser alteradas, de modo que o usuário possa manifestar parte de sua visão de mundo. Para esse fim, no protótipo, foram desenvolvidas as vistas da estrutura e da biblioteca (***Figura 5-12***).

Na **biblioteca** (***Figura 5-12-a***), o usuário seleciona os objetos que deseja inserir no arranjo. Na parte superior da vista são exibidos os objetos disponíveis para o usuário e na parte inferior os seus atributos previamente definidos em um arquivo XML (**Apêndice B**). Ao selecionar e inserir um objeto da biblioteca, o usuário cria na memória do computador uma instância da classe que define *Objeto*. Essa instância lê as informações do arquivo que lhe serve de gabarito para determinar sua aparência no modelo de relacionamentos e no modelo tridimensional. Nesse momento são também criados os objetos

componentes de *Objeto*, como os *Atributos* e a *Forma2D*. O objeto é então adicionado à lista de objetos do modelo.



(a) **(b)**

Figura 5-12: Vistas usadas para implementar: (a) o acesso à biblioteca de objetos e (b) a edição de seus atributos.

Depois de inserido, os atributos do objeto podem ser alterados na lista de atributos mostrada na ***Figura 5-12-a***. Sempre que um dos objetos é selecionado em uma das vistas do protótipo, seus atributos são exibidos na lista de atributos. Qualquer novo atributo definido pelo usuário também é exibido nessa área.

Na **estrutura** (***Figura 5-12-b***), os objetos são exibidos na parte superior da vista em uma estrutura em forma de árvore. Dessa forma, por exemplo, uma área pode conter vários objetos. Na parte inferior da vista são exibidos os atributos do objeto selecionado.

5.3.2.2 Os objetos e suas relações

Para permitir a visualização e a edição das relações entre os objetos foi implementada uma vista bidimensional que permite a criação de diagramas de relacionamento (***Figura 5-13***).

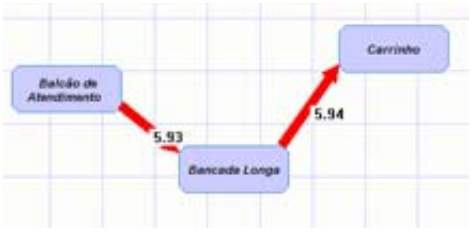


Figura 5-13: Implementação da edição de relacionamentos entre os objetos.

Nessa interface, o usuário pode mover e organizar as formas geométricas que representam os objetos do arranjo de acordo com a sua preferência. Além disso, o usuário usa esta vista para criar as relações entre cada um dos objetos do arranjo. Para criar um relacionamento basta ativar a função no menu ou barra de ferramentas e clicar sucessivamente em dois objetos.

5.3.2.3 A edição do arranjo no modelo tridimensional

Para permitir que o usuário possa manipular o arranjo de uma forma mais intuitiva foi implementada uma vista tridimensional (***Figura 5-14***), onde os objetos são exibidos com uma aparência mais próxima da do mundo real. Nessa vista, o usuário pode mover os objetos e rotacioná-los buscando a solução que o agrade e que satisfaça os seus critérios.

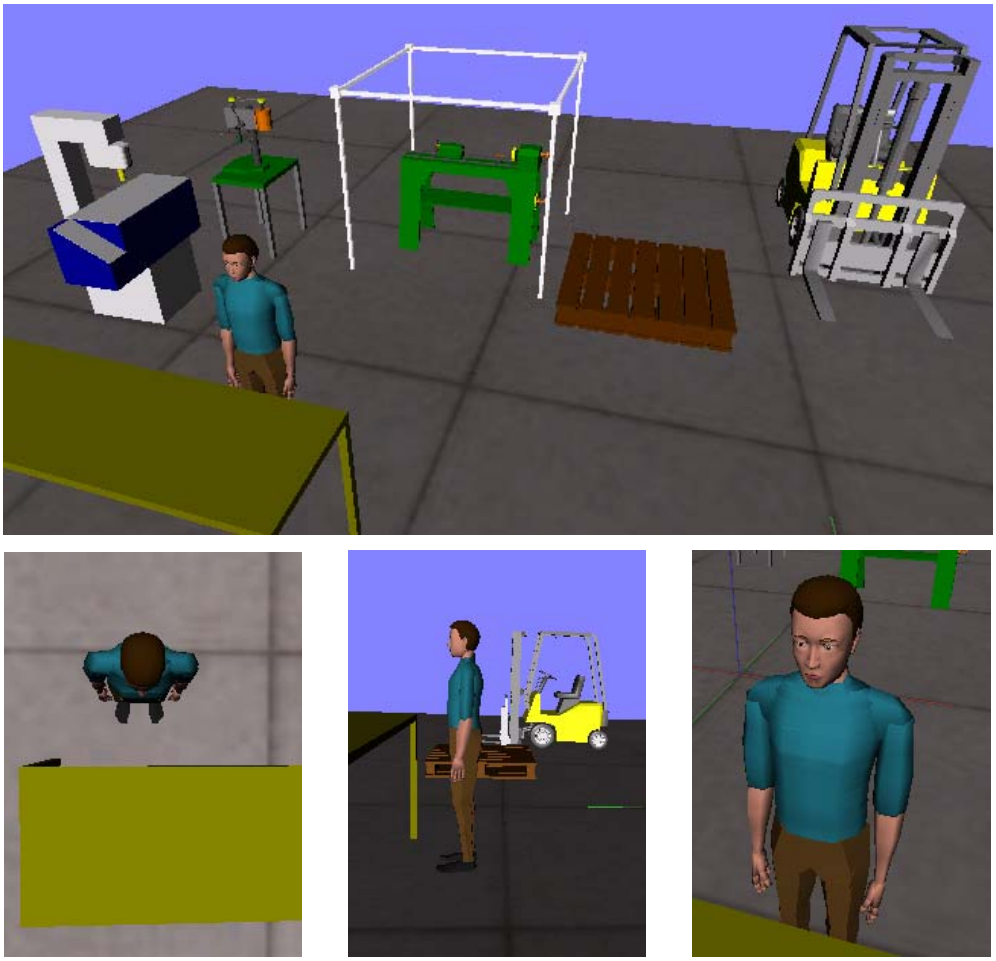


Figura 5-14: Vista do modelo tridimensional do arranjo físico

A interface tridimensional permite que o usuário posicione o arranjo de modo que facilite a sua manipulação, além de aumentar a sensação de realismo do modelo. Essa noção de realismo é importante tanto para a criação do arranjo físico como para a sua avaliação qualitativa.

O modelo tridimensional é mantido por uma biblioteca gráfica chamada OpenInventor (WERNECKE 1994a, 1994b), desenvolvida pela empresa Sylicon Graphics, distribuída comercialmente e também como código aberto. A OpenInventor mantém uma cena organizada por um grafo de cena. Cada nó desse grafo representa um objeto gráfico, uma matriz de transformação etc. Uma molécula de água, por exemplo, é representada como um grafo da forma mostrada na ***Figura 5-15***.

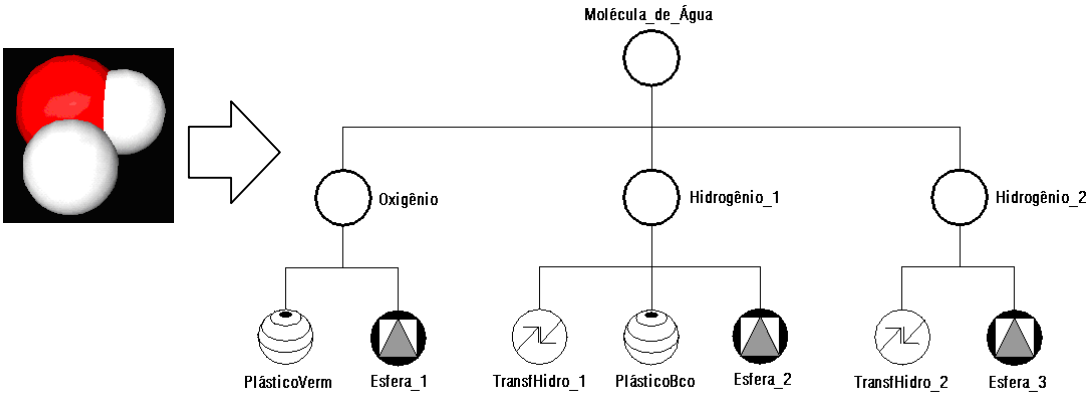


Figura 5-15: Representação de uma molécula de água como um grafo de cena na OpenInventor.

No grafo representado na ***Figura 5-15***, por exemplo, o átomo de oxigênio é constituído por três nós: a) *Esfera_1*, que define uma esfera, b) *PlasticoVerm*, que define um material que dá a cor vermelha à esfera e c) *Oxigênio*, que agrupa os dois nós anteriores. O formato de arquivo definido pela OpenInventor para o exemplo encontra-se no **Apêndice C**.

A escolha da OpenInventor deveu-se aos seguintes fatores:

a) possuir código aberto, o que permite alterações e ampliações

b) ter um baixo custo

c) facilitar a manipulação dos objetos

d) permitir o uso de arquivos criados em sistemas CADD e arquivos com formatos abertos, como os da linguagem VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) (WEB3D, 2006)

e) ser implementada em uma linguagem orientada a objetos, no caso, C++.

5.3.2.4 Regras sobre o arranjo físico

Para permitir que mais informações sejam acrescidas ao arranjo físico além daquelas dos relacionamentos qualitativos e quantitativos foi implementado no protótipo um

sistema especialista. O sistema especialista escolhido foi o FuzzyCLIPS, uma variante do sistema CLIPS (GIARRATANO & RILEY, 1998), desenvolvido pela NASA nos anos 1980. A escolha deveu-se ao fato desse sistema:

a) permitir a integração com programas desenvolvido em C++;

b) possuir código aberto, o que permite alterações e ampliações;

c) possuir uma comunidade grande de usuários;

d) ter um baixo custo;

e) permitir a tradução das mensagens do sistema para a língua portuguesa.

O FuzzyCLIPS (GOVERNO DO CANADÁ, 2006) permite, além das funcionalidades do CLIPS, a representação e manipulação de fatos e regras nebulosas ou inexatas (*fuzzy*). Foi desenvolvido no Integrated Reasoning Group no Instituto para a Tecnologia da Informação do Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá. Sua linguagem de programação é muito parecida com a linguagem LISP (HOLZ, 1985), uma linguagem comumente usada em sistemas especialistas pela capacidade de processar listas de símbolos. O módulo implementado teve traduzidas suas mensagens de interação com o usuário, mantendo-se intacta os comandos de sua linguagem.

Além dos dados sobre o arranjo físico como equipamentos e pessoas presentes no arranjo físico, distância entre eles etc. o sistema especialista (SE) permite que sejam acrescidas informações como restrições e outras de interesse do usuário do sistema. Mais importante do que apenas permitir o acréscimo de mais dados sobre o arranjo, o SE permite que os arranjos físicos sejam analisados quanto a determinadas regras pré-estabelecidas pelo usuário ou pelo conjunto de participantes do projeto.

A interface implementada (***Figura 5-16***) permite que o usuário emita comandos diretamente para o sistema especialista para alterar as informações presentes, para criar e alterar regras. Além disso, a mesma interface pode ser usada para implementar comandos que afetem o sistema e não apenas o SE.

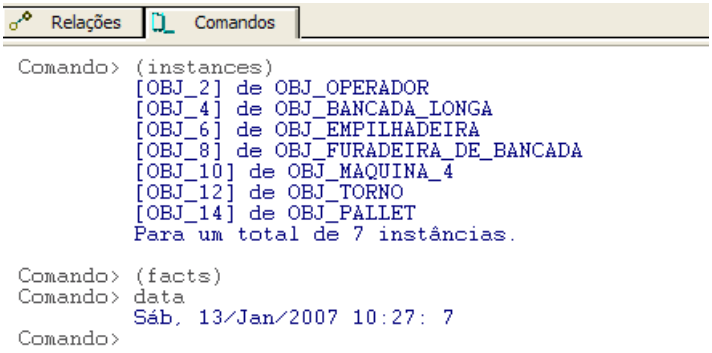


Figura 5-16: Interface com o sistema especialista

Na ***Figura 5-16*** são mostrados dois exemplos de comandos. O comando *(instances)* destina-se ao SE e pede para que seja exibida uma lista das instâncias de objetos definidos no sistema. No exemplo, observa-se, por exemplo, que [OBJ_2] é da classe OBJ_OPERADOR, i.e., possui atributos e métodos daquela classe. O comando *data*, por sua vez, não é destinado ao SE e sim ao protótipo e apenas imprime a data corrente.

A utilização desse sistemas de regras será mostrada com maiores detalhes na seção que trata da utilização do protótipo.

5.3.3 Criação de um módulo de fluxo de materiais

Para testar a possibilidade de expansão do sistema usando a estrutura do formalismo, foi desenvolvido um módulo de fluxo de materiais, similar ao Factory. Uma das críticas feitas aos cálculos do Factory é que não considera a variabilidade presente nos sistemas produtivos, a qual tem impactos consideráveis sobre o desempenho (MENEGON et

al., 2004,1999). Para superar essa limitação, os valores fornecidos para as quantidades transportadas, valores associados aos dispositivos de manuseio, entre outros, deveriam permitir a especificação de distribuições probabilísticas.

Como o formalismo foi pensado desde o início para ser flexível e expansível, foi possível derivar o módulo de maneira coerente. O primeiro aspecto positivo foi o uso de uma classe específica para os valores dos atributos.

5.3.3.1 Utilização do mecanismo de herança

O mecanismo de herança oferecido pela orientação a objetos disponível em C++ permite que o programa computacional possa ser expandido com pouco esforço. Seguindo esse princípio, foi construída uma classe geral de grafos, pensada como base para modelar os relacionamentos dos modelos. Após a sua criação foram derivadas, então, duas classes: uma de cálculo tradicional de arranjo físico e uma outra classe que considera a variabilidade dos processos.

5.3.3.1.1 Construção de uma classe geral de grafos

Como ***primeiro passo***, houve a implementação de uma classe chamada *CDigrafo* para implementar as funcionalidades básicas de grafos e, mais especificamente, de um grafo direcionado. A classe *CDigrafo* possui como sub-componentes outros objetos para representar os vértices (*CVertice*) e Arcos (*CArco*) do grafo, armazenados nos vetores *Vertices* e *Arcos* (***Figura 5-17***).

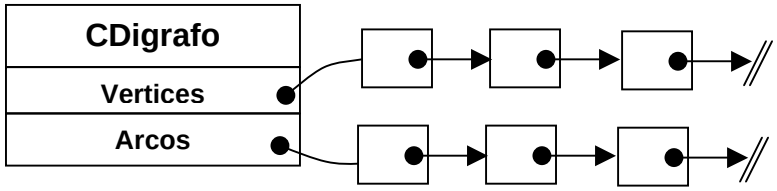


Figura 5-17: Esquema da agregação de vértices e arcos em um grafo direcionado.

A classe *CDigrafo* possui métodos para manipular esses componentes. Para acrescentar nós ao vértice, por exemplo, é usado o método *Adicionar*, da seguinte forma: *CDigrafo.Vertices.Adicionar(NovoVertice).* Para apagar um dos vértices usa-se *CDigrafo.Vertices.Apagar(Indice do Vertice a Apagar).*

Além dessas funcionalidades, a classe possui métodos de cálculo tradicionalmente usados em grafos, como a menor distância entre dois nós e para determinação de ciclos (circuitos fechados). Exemplos desses algoritmos incluem os de Floyd e Dijkstra (WILSON, 1985). Dessa forma, esses métodos estão prontos para operar com os dados de um objeto derivado da classe *CDigrafo*.

A classe *CDigrafo* serve como base para o desenvolvimento de classes que implementem o conceito de *Relacionamento*, tal como exposto no formalismo. Com isso, é possível derivar, a partir da mesma estrutura de dados, classes que representem e manipulem relacionamentos quali e quantitativos. Na seção a seguir é mostrado como essa classe pode ser usada para criar uma nova classe para o cálculo de fluxo de materiais.

5.3.3.1.2 Construção de uma classe para cálculo de fluxo de materiais

Nessa etapa foi derivada uma classe-filha *CFluxoDeMaterial* a partir da classe-mãe, *CDigrafo*. Essa nova classe herda prontamente todos os componentes e os métodos da classe-mãe. Assim, é possível usar os métodos para determinar qual é o menor caminho entre dois pontos da rede de fluxo de materiais e se há um caminho em circuito fechado no arranjo.

Para poder implementar os cálculos usados nos fluxos de materiais é preciso utilizar uma série de atributos associados aos objetos que atuam como movimentadores de materiais, as áreas de atividade e aos fluxos de materiais. Como há necessidade de se saber exatamente qual atributo definido pelo usuário possui o dado necessário para os cálculos foi

criado um mecanismo em que um arquivo de configuração permite que o usuário faça essa associação (***Figura 5-18***).

```
<Contents>
      <Bind What='Attribute' Name='Produto' To='PRODUCT'>
      <Bind What='Attribute' Name='Volume' To='VOLUME'>
      <Bind What='Attribute' Name='Peça' To='PARTNAME'>
      <Bind What='Attribute' Name='Qtde de Peças por Prod' To='PARTQTY'>
      <Bind What='Attribute' Name='Usar Equipamento' To='USEEQUIP'>
      <Bind What='Attribute' Name='Qtde por Viagem' To='LOADSIZE'>
      <Bind What='Attribute' Name='Refugo' To='SCRAP'>
      <Bind What='Attribute' Name='Freqüência' To='FREQ'>
</Contents>
```

Figura 5-18: Exemplo de associação de atributos criados pelo usuário e os valores usados no cálculo de materiais.

O objeto derivado da classe *CFluxoDeMaterial* ao ser criado na memória do computador faz a leitura do arquivo de configuração, o que determina quais atributos serão usados no momento dos cálculos.

Após isso, foi implementado um método chamado *Calcular()*, que realiza os cálculos de fluxo de materiais, utilizando as fórmulas contidas no **Anexo A**. Para invocar esse método é usada a forma *CFluxoDeMaterial.Calcular()*. Os dados serão obtidos dos objetos do modelo e serão usados nos cálculos. Após a execução dos cálculos, os valores são exibidos na vista bidimensional do modelo (***Figura 5-19***)

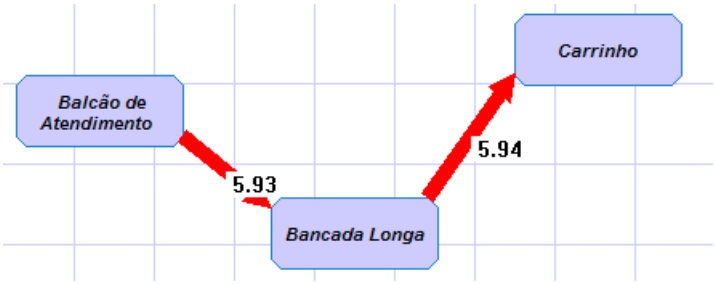


Figura 5-19: Exibição dos fluxos depois de efetuados os cálculos da classe CFluxoDeMaterial.

Da mesma forma que foi derivada a classe *CFluxodeMaterial* podem ser derivadas outras classes, por exemplo, uma classe para a análise do fluxo temporal necessário em um Mapa de Fluxo de Valor (ROTHER & SHOOK, 1998) derivada de *CDigrafo* ou mesmo de *CFluxoDeMaterial*.

5.3.3.1.3 Implementação de um simulador estocástico de fluxos

Diferentemente do Factory que armazena valores como varáveis simples (inteiras, dupla-precisão etc.) os valores dos atributos foram modelados como sendo objetos da classe *CValor*, conforme mostrado na ***Figura 5-6***. Ao criar a classe *CValor*, foi possível criar um campo que armazena uma expressão, avaliada no momento da utilização do valor. Esse campo chamado de *Expressão* permite que sejam escritas fórmulas e é isso precisamente que permite que sejam usados valores probabilísticos além dos determinísticos. Para isso, o usuário determina que o atributo criado seja do tipo *Expressão* e fornece uma expressão de um valor probabilístico. Ex: Um produto a ser fabricado no arranjo físico pode ter seu atributo *Volume* com a expressão *NORMAL(10,0.2)*. Isso faz com que, no momento dos cálculos dos fluxos de materiais seja gerado um valor que segue uma distribuição normal com média 10 e desvio padrão 0.2.

No uso tradicional do Factory, para cada arranjo físico é executado apenas um cálculo. Com a possibilidade de utilizar valores aleatórios, o módulo de fluxo de materiais implementado tornou-se um simulador do tipo Monte-Carlo (***Figura 5-20***). Na simulação de Monte-Carlo (KALOS & WHITLOCK, 1986), necessita-se basicamente de um problema estruturado (no caso, a rede de fluxo de materiais) e um gerador de números aleatórios.

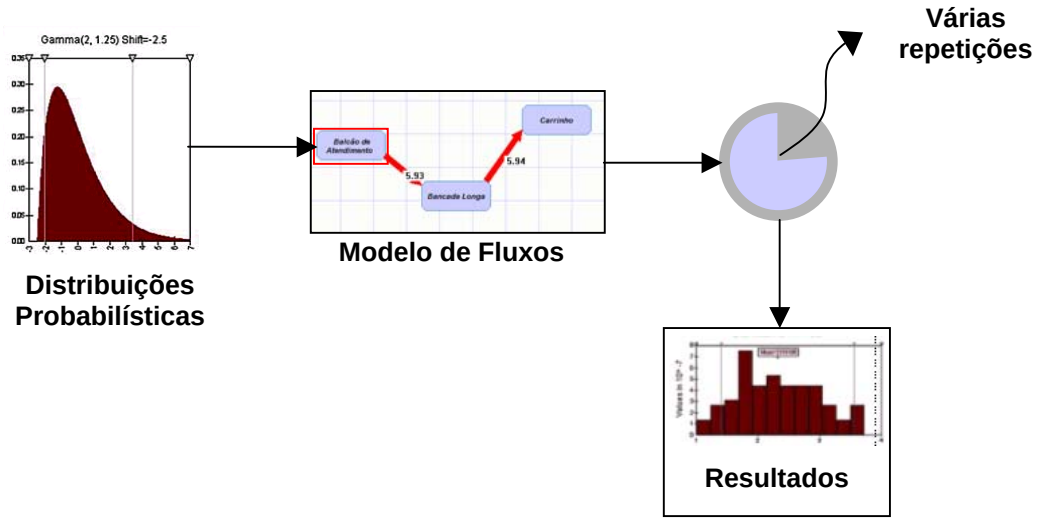


Figura 5-20: A possibilidade de uso de expressões probabilística permitiu o desenvolvimento de um simulador de Monte-Carlo.

Uma vantagem importante dessa abordagem decorrente do uso dos valores aleatórios é permitir ao usuário do sistema obter conhecimento da distribuição dos custos e distâncias percorridas no arranjo fisico. Na abordagem tradicional, há apenas um valor apresentado. Na abordagem adotada, o resultado é fornecido na forma de uma distribuição de valores, onde o usuário pode identificar a média, desvio padrão, o valor máximo, o valor mínimo, o mais provável etc. Isso, considerando um dado intervalo de confiança. Se no Factory a resposta era da forma “o custo é X”, com a abordagem adotada a resposta passa a ser: “o custo máximo esperado é X, com um intervalo de confiança de 95%”.

Uma outra característica interessante do uso da classe *CValor* é a possibilidade de associar a objetos da classe *CValor* restrições de valores. Assim, se os valores fornecidos ou calculados estiverem fora dos intervalos permitidos, o usuário será notificado disso.

5.4 Exemplo de utilização do protótipo

Para apresentar algumas das possibilidades de uso do protótipo será apresentado um exemplo hipotético de análise de arranjo físico.

Uma pequena empresa deseja introduzir um novo tipo de produto em sua linha de produção. Atualmente no setor afetado é produzido apenas um produto que segue as seguintes etapas de produção:

(a) o componente principal, chamado de corpo é retirado do estoque e é levado para a bancada de montagem onde recebe os demais componentes;
(b) depois de montado o produto deve ser testado em uma máquina de testes, na segunda bancada;
(c) depois dos testes, o produto deve ser limpo com um aspirador de pó e embalado;
(d) após serem embalados, os produtos aprovados são colocados em um *pallet* para depois serem levados de empilhadeira para o estoque de produtos acabados;
(e) são produzidas 1200 unidades mensais do Produto 1.

O novo produto seguirá a mesma seqüência de produção, com as seguintes alterações:

(a) devido ao grande volume de peças, será necessário colocar mais duas bancadas para montagem e teste;
(b) os corpos serão trazidos por empilhadeira até as bancadas de montagem a partir do Setor de Moldagem;
(c) o aspirador a ser usado pelos dois processos deve ser compartilhado entre as duas bancadas de teste;
(d) Serão produzidas 4500 unidades mensais do Produto 2.

5.4.1 Etapa 1: Criação dos objetos do arranjo fisico

O primeiro passo para analisar esse arranjo no protótipo é a introdução dos elementos componentes do arranjo físico, o que implica a alteração de seus atributos e o seu posicionamento no chão-de-fábrica.

5.4.1.1 Introdução dos produtos

O primeiro elemento a ser introduzido é o objeto que representa o produto. Para isso, o objeto *Produto* é selecionado da biblioteca de objetos e inserido na vista de relacionamentos, como mostrado na ***Figura 5-21:***

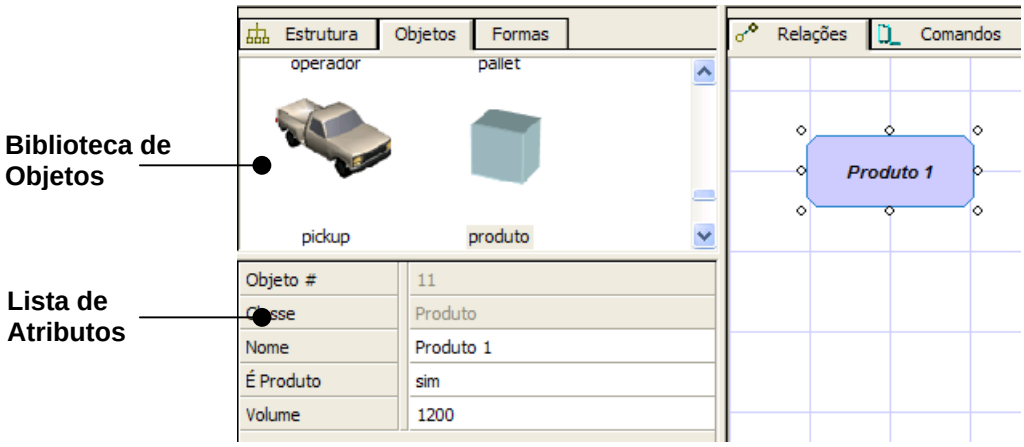


Figura 5-21: Introdução de um produto

Como pode ser observado na ***Figura 5-21***, os atributos que o definem como produto são o *É Produto* e o *Volume*. Tanto o nome do objeto como esses valores podem ser alterados na lista de atributos do objeto.

Qualquer outro objeto que os possua pode ser usado nas análises de fluxo de material. Se o usuário o desejar pode acrescentar manualmente esses atributos a um objeto que anteriormente não os possuía.

Como nessa etapa a preocupação principal é o processo, o usuário pode maximizar a janela dos relacionamentos e posicionar os objetos de acordo com a sua seqüência no processo. Depois da definição do Produto 1, são posicionados as bancadas e *pallets* usados como estoques. Com isso, obtém-se algo parecido com o mostrado na ***Figura 5-22***.

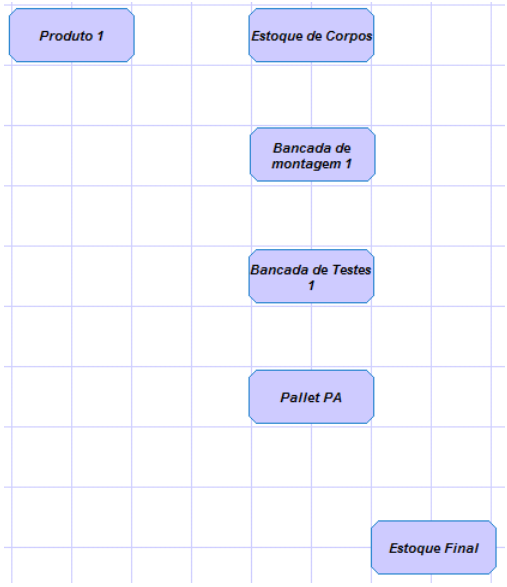


Figura 5-22: Colocação dos objetos do processo do produto 1

Antes de proceder à introdução do novo produto, decidiu-se por organizar o arranjo físico de forma que os objetos ocupassem as mesmas posições do *layout* atual. Para isso, a janela do modelo físico foi ampliada para que se pudesse arranjar os objetos (***Figura 5-23***).

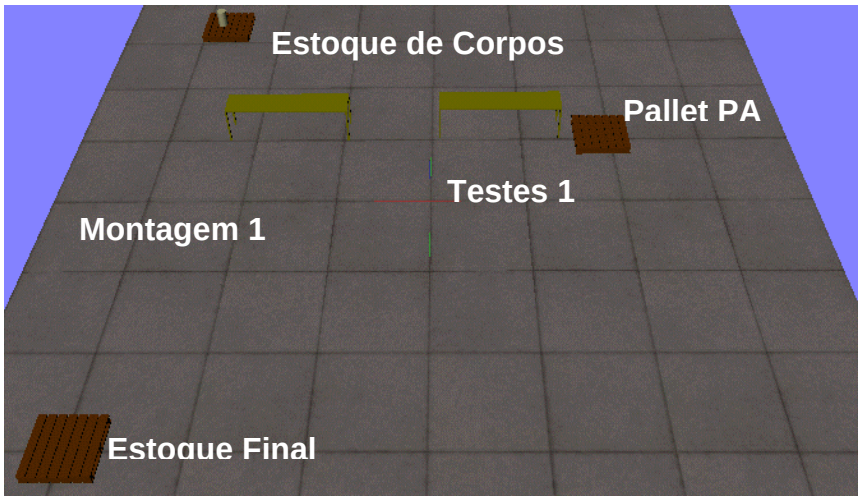


Figura 5-23: Disposição dos objetos no arranjo fisico

Depois de dispostos os objetos para a fabricação do Produto 1 foram colocados os objetos para o Produto 2 (***Figuras 5-29*** e ***5-30***)

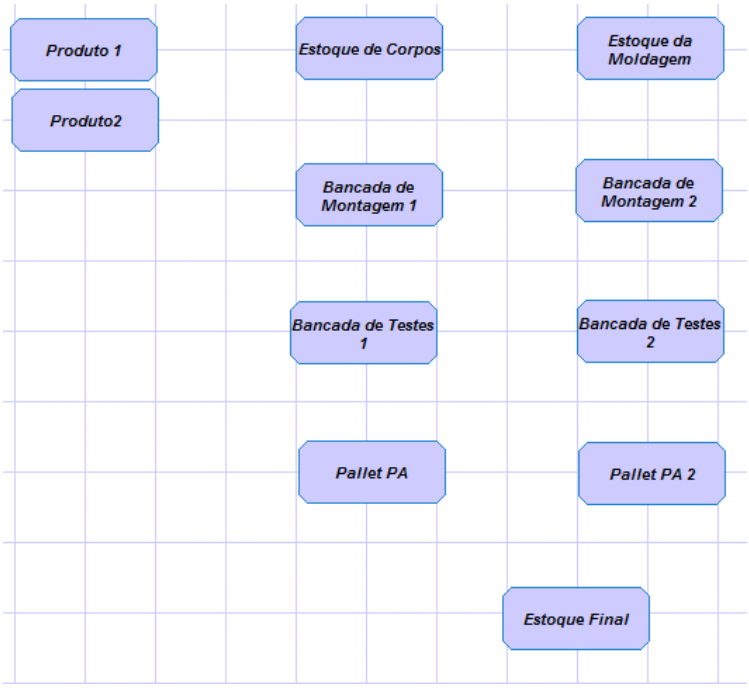


Figura 5-24: Os objetos do arranjo sob estudo

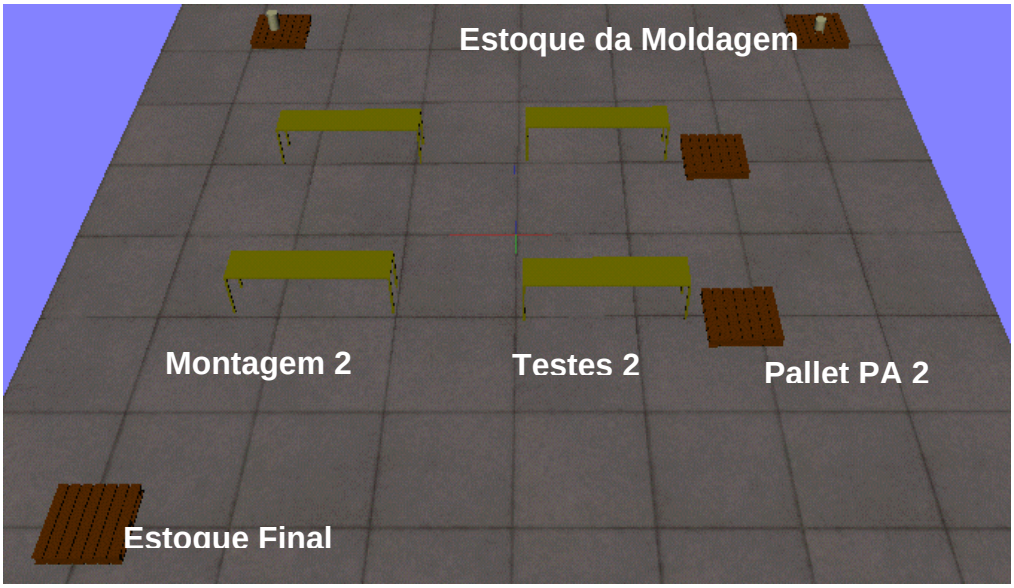


Figura 5-25: Arranjo inicial dos objetos

Para operar os processos são necessários 4 funcionários, designados por *Montador 1*, *Montador 2*, *Operador de Teste 1* e *Operador de Teste 2* que ocupam postos de trabalho nas respectivas bancadas. Além desses, é usada uma empilhadeira para transportar

os *pallets* de matérias-primas até os postos de montagem e levar os *pallets* de produtos acabados até o estoque final (***Figura 5-26***).

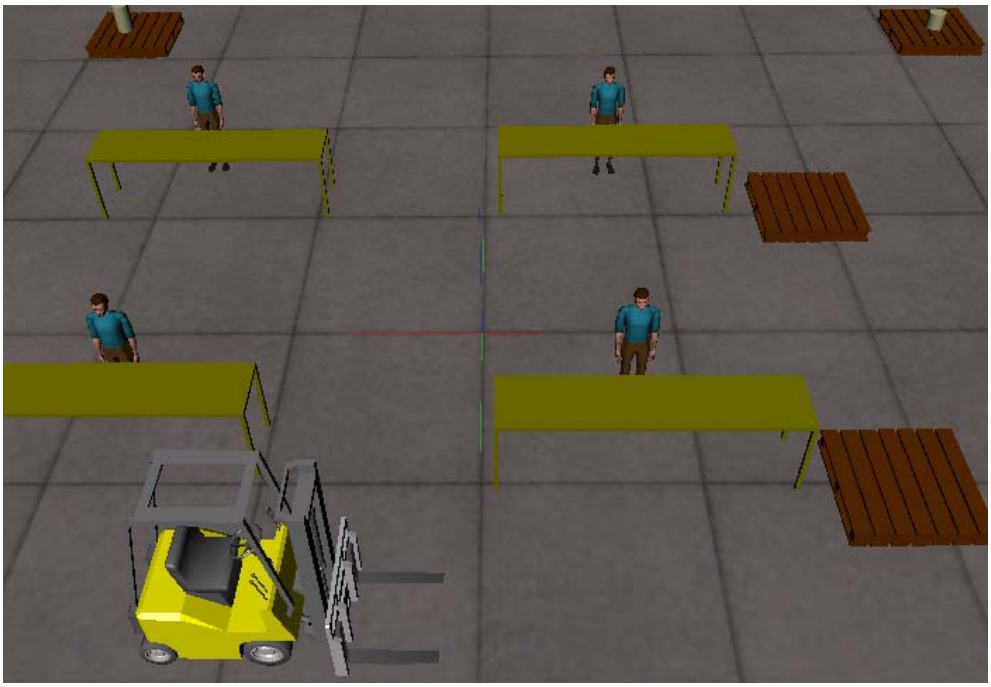


Figura 5-26: Quatro funcionários operam o processo e a empilhadeira transporta os pallets

Os movimentadores, como a *Empilhadeira*, já devem conter os atributos usados nos cálculos de fluxo de material (**Anexo A**). Esses atributos são:

- Nome
- Tipo
- Quantidade de recursos
- Custo de investimento anual
- Custo horário de combustível, energia e manutenção
- Custo horário da mão-de-obra
- Minutos disponíveis anualmente
- Tempo de carga e descarga em minutos
- Velocidade média (m/min)
- Eficiência percentual, ou seja, percentual do tempo disponível em que o dispositivo estará efetivamente transportando cargas.

5.4.2 Etapa 2: Análise do fluxo de materiais

Nessa etapa são estabelecidos os fluxos de materiais entre os objetos e a quantificação dos seus custos.

5.4.2.1 Estabelecendo os fluxos de materiais

Os fluxos de materiais entre os objetos do arranjo físico são estabelecidos através de relações de fluxo. Para estabelecer as relações o usuário do protótipo deve acionar a criação desse tipo de relação e clicar nos objetos de origem e destino na vista dos relacionamentos. Será criada uma seta de fluxo indicando a relação. Para o exemplo, obtém-se um relacionamento como o mostrado na ***Figura 5-27***.

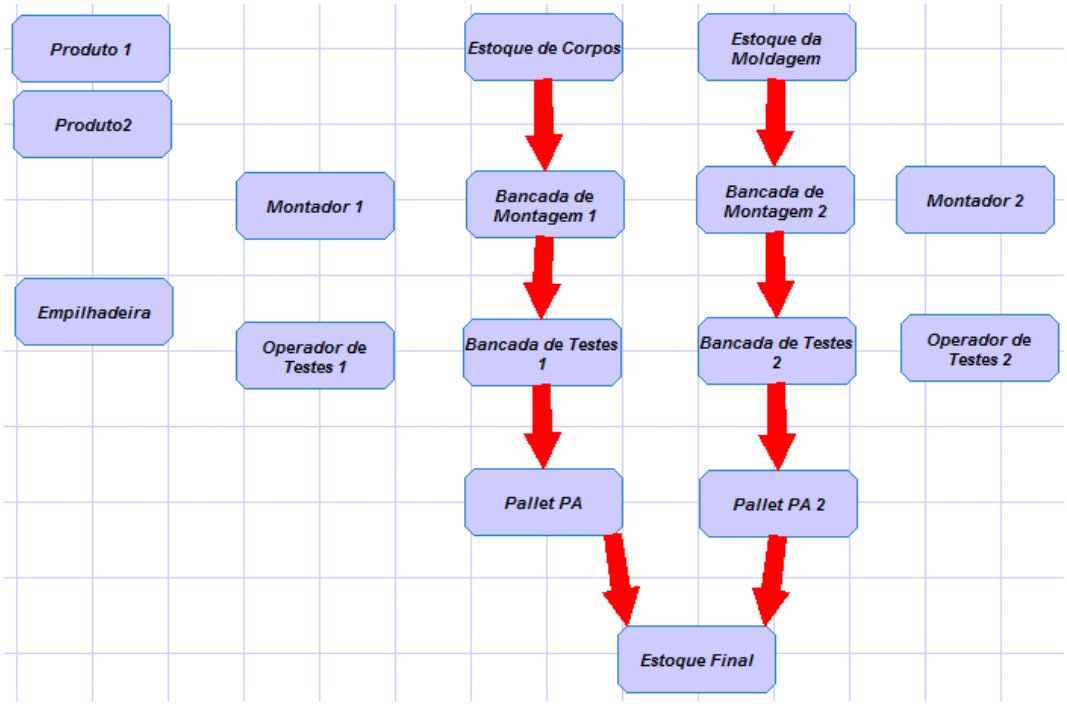


Figura 5-27: Relacionamentos de fluxo para o exemplo.

Cada uma das relações de fluxo possui uma série de atributos criados automaticamente pelo próprio objeto. Cada tipo de relação deve criar seus próprios atributos

padronizados, tanto os que são editáveis pelo usuário como também os que terão seus valores calculados automaticamente (***Figura 5-28***).

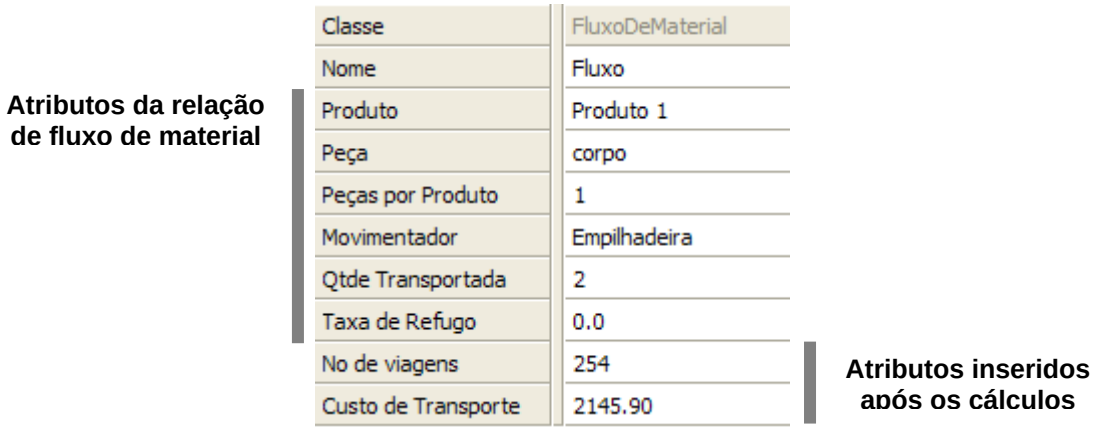


Figura 5-28: Inclusão de atributos nas relações de fluxo da freqüência e custo

Para as relações de fluxo, os atributos são os seguintes:

- **Nome do produto** – Produto1 ou Produto2
- **Nome do componente transportado** – Nos fluxos até as montagens, são transportados *Corpos*. Entre as montagens e as bancadas de teste são transportados *Produtos Montados*. A partir daí são *Produtos Acabados*.
- **Qtde. de componentes por produto**. No caso, são iguais a 1, pois há 1 corpo por produto a ser fabricado e 1 produto acabado por cada um a ser produzido.
- **Movimentador:** Nome do objeto que leva materiais de um ponto a outro do trajeto. No caso, um dos operadores ou a empilhadeira (**QUADRO 13**).
- **Qtde. transportada:** Quantidade levada em cada uma das viagens.

Produto	Trajeto	Movimentador
1	Estoque de Corpos – Bancada de Montagem 1	Empilhadeira
	Bancada de montagem 1 – Bancada de testes 1	Montador 1
	Bancada de testes 1 – Pallet PA	Operador de testes 1
	Pallet PA – Estoque Final	Empilhadeira
2	Estoque da Moldagem– Bancada de Montagem 2	Empilhadeira
	Bancada de montagem 2 – Bancada de testes 2	Montador 2
	Bancada de testes 2 – Pallet PA 2	Operador de testes 2
	Pallet PA 2 – Estoque final	Empilhadeira

QUADRO 14: Movimentadores usados no transporte de material pelo arranjo

5.4.2.2 Analisando o fluxo de materiais do arranjo fisico

Já foram adicionados até agora os três elementos básicos para o cálculo dos fluxos de materiais: a) os produtos, b) os movimentadores e c) as relações de transporte. Ao acionar a função do menu que dispara a análise de fluxo de materiais, essas informações são retiradas do modelo e usadas nas fórmulas apresentadas no **Apêndice A**.

Depois de efetuados os cálculos as informações são apresentadas na forma de relatório (***Figura 5-29***) e também graficamente na vista dos relacionamentos. As espessuras das linhas de fluxo são atualizadas (***Figura 5-30***) para representar a intensidade do fluxo de materiais. Além disso, a intensidade de fluxo é associada a cada fluxo como um atributo ***(Figura 5-28)*** .

Custo entre objetos usando Empilhadeira									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0 - Estoque de Corpos	-	441.40	-	-	-	-	-	-	-
1 - Bancada de Montagem 1	-	-	251.41	-	-	-	-	-	-
2 - Bancada de Testes 1	-	-	-	308.63	-	-	-	-	-
3 - Pallet PA	-	-	-	-	924.33	-	-	-	-
4 - Estoque Final	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 - Estoque da Moldagem	-	-	-	-	-	-	1604.79	-	-
6 - Bancada de Montagem 2	-	-	-	-	-	-	-	2112.84	-
7 - Bancada de Testes 2	-	-	-	-	-	-	-	-	1750.58
8 - Pallet PA 2	-	-	-	-	1003.55	-	-	-	-

Figura 5-29: Exemplo de relatório gerado pela análise de fluxo de materiais

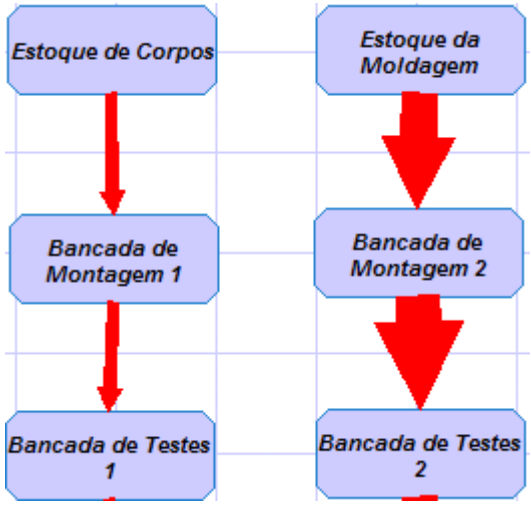


Figura 5-30: Linhas de fluxo exibindo a intensidade de fluxos

5.4.2.3 Alterando o arranjo e recalculando os fluxos de materiais

Após essa primeira análise o arranjo físico pode ser alterado para testar outras maneiras de ocupação do espaço. Para alterar o arranjo, os objetos devem ser movidos na vista tridimensional até obter um outro arranjo físico que satisfaça seu criador (***Figura 5-31***).

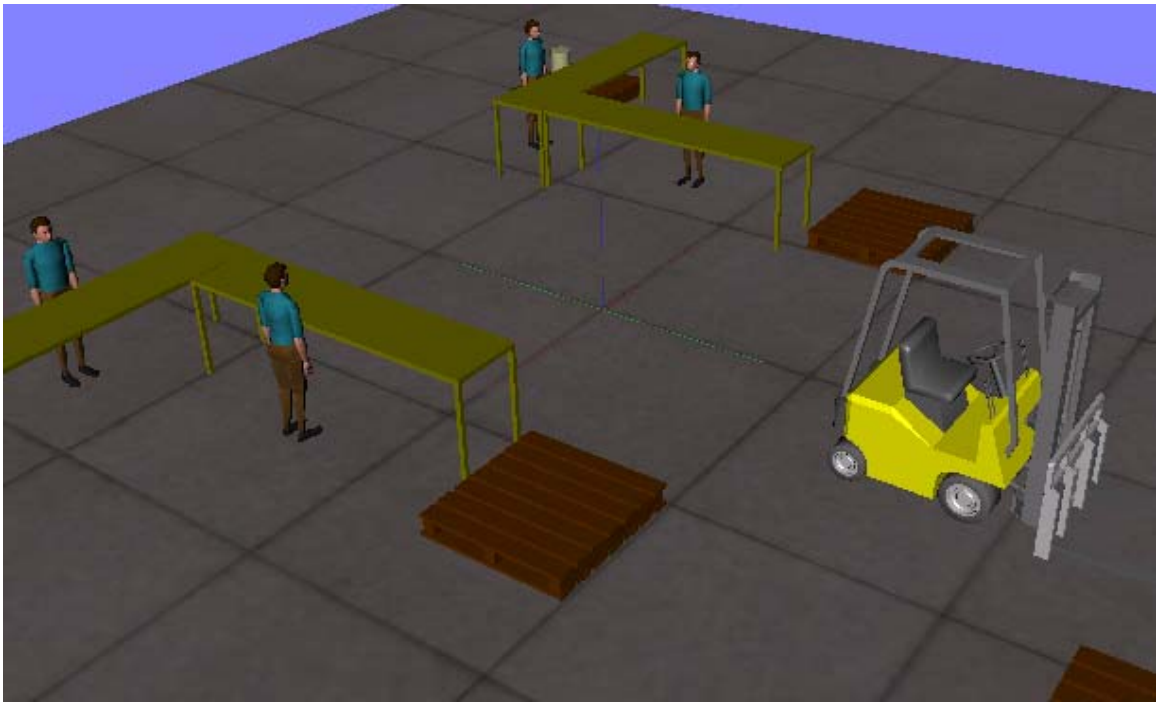


Figura 5-31: Arranjo alterado.

Uma vez alterado o arranjo físico, pode-se executar novamente o cálculo de fluxo de materiais para comparar os resultados anteriores com o novo arranjo físico.

5.4.3 Etapa 3: Trabalhando com relações qualitativas

As relações de fluxo de materiais são expressões de uma grandeza quantitativa. Além dessas, existem outras relações que exprimem conceitos necessários que orientam o processo de disposição dos objetos do arranjo. Uma possibilidade importante do formalismo relacional proposto é poder registrar no próprio modelo essas informações que orientarão os participantes do grupo de projeto durante a construção das soluções.

No exemplo corrente, usaremos relações qualitativas para representar a necessidade de que o aspirador e os *pallets* de produtos acabados devem estar posicionados junto às duas bancadas de teste. Usando a representação tradicional da CRP teríamos a situação mostrada na ***Figura 5-32***. Nessa figura, pode ser observado que é *absolutamente*

necessário (A) que as bancadas de teste estejam próximas ao aspirador e que é *importante* (I) que os *pallets* estejam próximos das bancadas de teste.

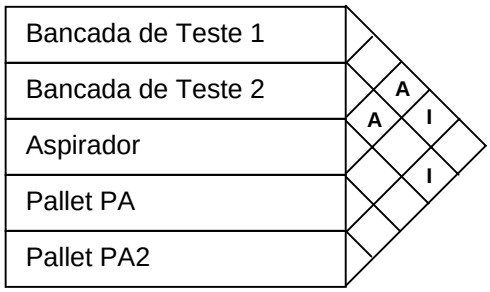


Figura 5-32: *Carta de relações preferenciais para o exemplo*

Deve-se observar que apesar de se saber que os *pallets* devem estar próximos às bancadas por causa dos fluxos de materiais, optou-se por mostrar a possibilidade de manifestar a proximidade em situações em que os volumes de fluxo não sejam conhecidos *a priori*.

5.4.3.1 Criando as relações qualitativas de proximidade

Após a inserção do aspirador no arranjo, as relações qualitativas podem ser inseridas na vista dos relacionamentos. Usando a função para inclusão de relações, são criadas as 4 relações mostradas na ***Figura 5-32***. Cada uma dessas relações possui os atributos mostrados na ***Figura 5-33***.

Classe	Proximidade
Nome	Proximidade
Intensidade	A
Motivo	Uso intenso

Figura 5-33: Atributos associados a uma relação qualitativa de proximidade

Após a inclusão das relações qualitativas de proximidade, a vista com os relacionamentos fica como mostrado na ***Figura 5-34***.

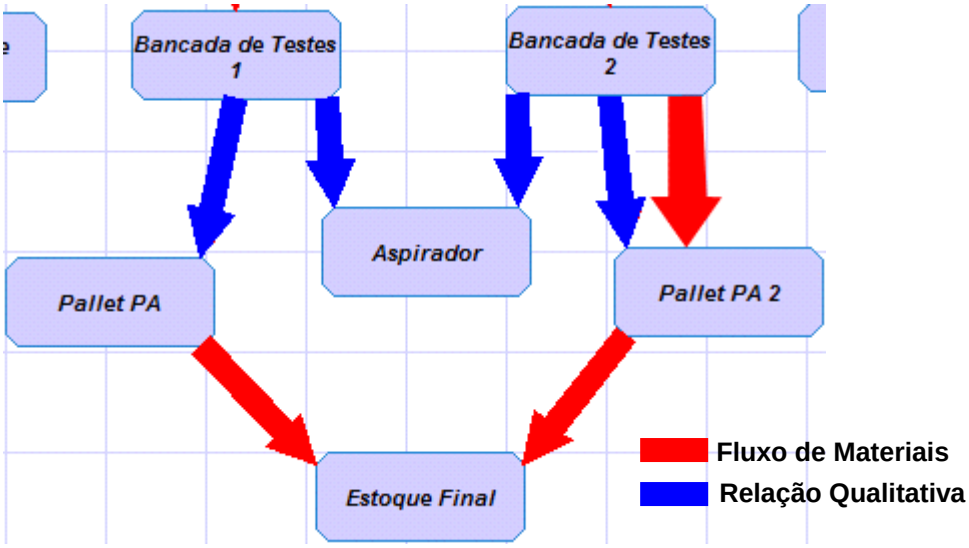


Figura 5-34: Vista dos relacionamentos qualitativos e quantitativos do exemplo.

5.4.4 Etapa 4: Trabalhando com regras

Com a integração no protótipo dos modelos qualitativos e quantitativos, é possível usar regras para avaliar, limitar ou identificar características do arranjo fisico.

O conhecimento é representado em CLIPS basicamente por fatos e regras. Os fatos são afirmações que descrevem o estado do sistema modelado. As regras definem mecanismos de como fatos são considerados e quais as ações decorrentes daqueles fatos. Uma regra é composta de duas partes: uma condicional e uma de ações. Uma vez satisfeitas as condições definidas na primeira parte (também chamada de LHS – *left hand side*), são efetuadas as ações da outra parte (também chamada de RHS – *right hand side*). A

***Figura* 5-35** mostra o mecanismo de disparo de regras. O sistema especialista mantém uma lista de fatos (A). Cada novo fato que surge ativa as regras que possuem esse fato na parte condicional (B). Uma regra com toda a sua parte condicional satisfeita fica em condições de ser disparada, ou seja, executar suas ações. C) Ao ser ativada a máquina de inferência do sistema as regras em condições são disparadas. No nosso exemplo será adicionado mais um fato à lista de fatos: *(vamos pescar).*

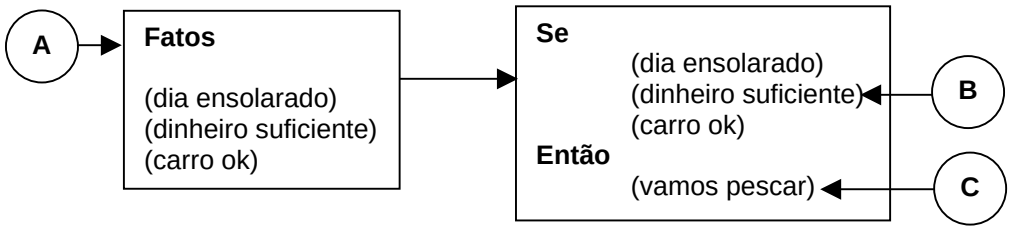


Figura 5-35: Mecanismo de disparo de regras de produção

Essa regra escrita na linguagem do CLIPS seria escrita da seguinte forma (***Figura 5-36***):

```
(defrule pescaria
      (dia ensolarado)
      (dinheiro suficiente)
      (carro ok)
=> (assert (vamos pescar)))
```

Figura 5-36: Uma regra de produção escrita em CLIPS.

A interação com o sistema de regras (SR) é feita através de uma interface de comandos. Para emitir um comando para o sistema, ele é digitado e seguido da tecla <ENTER>. Por exemplo, para obter uma lista de objetos existentes, deve-se digitar *(instances)*, como mostrado na ***Figura 5-37***.

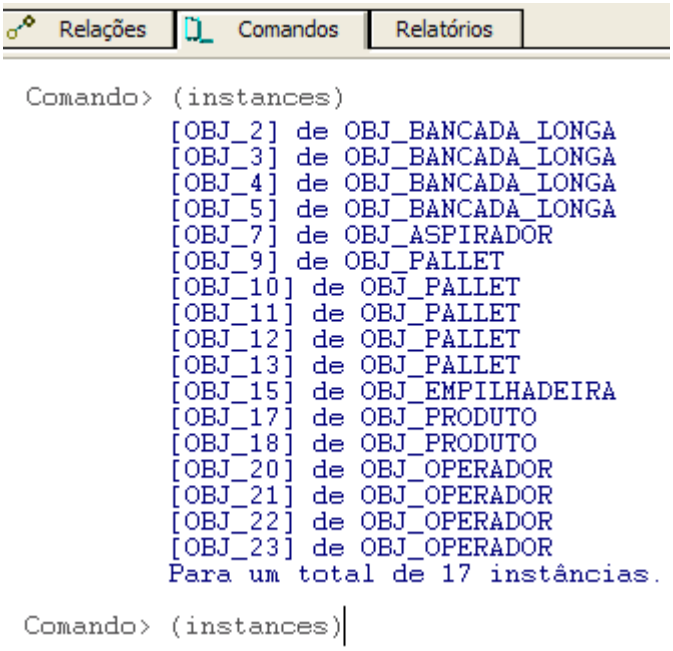


Figura 5-37: Como listar objetos do SR.

No SE, os objetos são registrados como instâncias de classes. Para obter mais detalhes sobre um deles deve-se enviar uma mensagem para que o mesmo imprima essas informações (***Figura 5-38***). Todos os atributos mostrados podem ser usados em regras no modelo.

```
Comando> (send [OBJ_15] print)
         [OBJ_15] de OBJ_EMPILHADEIRA
         (nome "Empilhadeira")
         (id 15)
         (Tipo 6)
         (E_Movimentador sim)
         (Capacidade 7.0)
         (Recursos 1)
         (Custo_de_Investimento 8225)
         (Custo_Comb_En_Manut 2.35)
         (Custo_do_Operador 35.25)
         (Disponibilidade 1920.0)
         (Tempo_de_Carga_e_Descarga 1.0)
         (Velocidade 18.88)
         (Eficiencia 70.0)

Comando>
```

Figura 5-38: Envio de mensagem de impressão para um dos objetos.

Como exemplo, será criada uma regra que verifica se o aspirador está presente no arranjo físico. Para isso, é digitado o comando mostrado na ***Figura 5-39***:

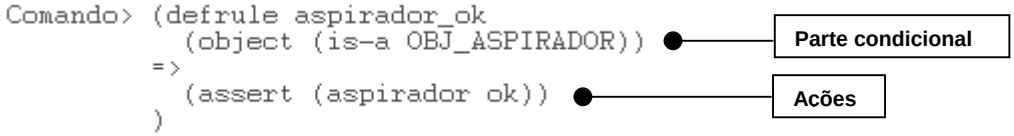


Figura 5-39: Criação de uma regra para determinar a presença de um equipamento

Se o aspirador estiver presente, essa regra cria um fato, que é uma declaração na forma *(aspirador ok)*. Fatos, juntamente com objetos, podem ser testados na parte condicional de regras. Sempre que uma parte condicional é satisfeita, as regras são ativadas e eventualmente disparadas, executando as instruções da parte das ações da regra. Para testar essa regra (***Figura 5-40***), fazemos a máquina de inferência do sistema especialista analisar os fatos, objetos e regras com o comando *(run)*. O resultado aparecerá na forma de fatos e mensagens impressas na tela.

```
Comando> (run)
Comando> (facts)
         f-0     (aspirador ok) FC 1.00
         Para um total de 1 fato.

Comando>
```

Figura 5-40: Executando a máquina de inferência.

Observe que foi criado o fato esperado, uma vez que o arranjo físico já possui o aspirador. A regra apesar de simples pode ser usada no momento da comparação de dois arranjos, que podem diferir pela presença de determinados equipamentos.

No momento do estabelecimento de relações entre os objetos, são também criados fatos que descrevem a existência dessas relações, que podem ser consultadas através de regras. Com isso é possível implementar restrições, verificar condições etc. A seguir são apresentadas algumas regras que podem ser implementadas no modelo.

5.4.4.1 Regra para verificação de distância máxima entre equipamentos

A regra a seguir sugere a aproximação de áreas distantes que mantenham uma relação do tipo A, ou seja, uma situação em que é absolutamente necessário que as áreas estejam próximas uma da outra. Isso é possível pois o sistema cria automaticamente fatos que descrevem a distância entre os objetos quando são criadas as relações de proximidade, como mostrado na ***Figura 5-34***. A relação de distância possui a seguinte forma:

```
(relação distancia <obj1> <obj2> <valor>)
```

Já a relação de proximidade é expressa como um fato da forma:

```
(relacao proximidade <obj1> <obj2> <valor>)
```

A seguir é mostrada uma regra (***Figura 5-41***) que testa todas as distâncias entre os objetos que possuem algum tipo de relação de proximidade entre si. Se o valor for maior

do que 10m e se a relação de proximidade for do tipo A, será impressa uma mensagem para que o usuário aproxime esses objetos.

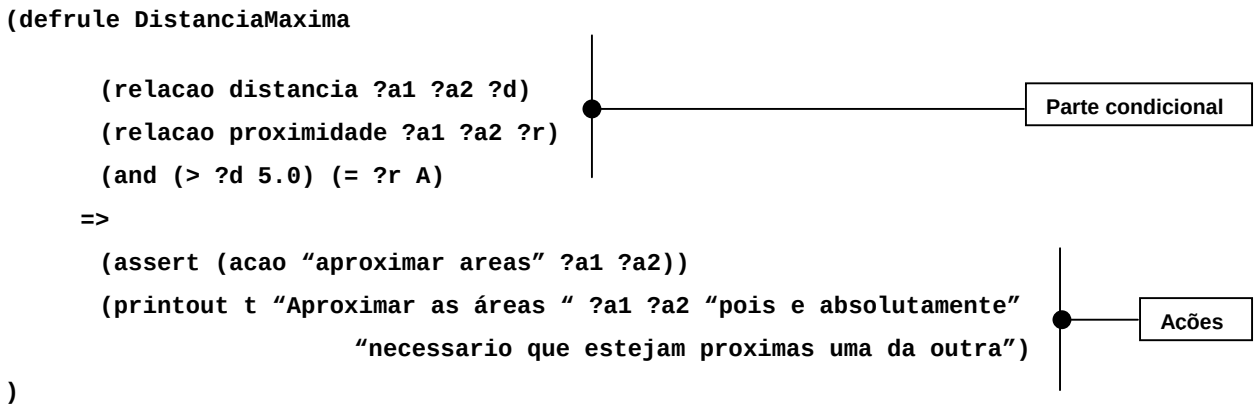

(defrule DistanciaMaxima
(relacao distancia ?a1 ?a2 ?d)
(relacao proximidade ?a1 ?a2 ?r)
(and (> ?d 5.0) (= ?r A)
=>
(assert (acao “aproximar areas” ?a1 ?a2))
(printout t “Aproximar as áreas “ ?a1 ?a2 “pois e absolutamente”
“necessario que estejam proximas uma da outra”)
)
Parte condicional
Acões

Figura 5-41: Regra para verificar a distância máxima entre dois objetos

Para que a regra seja executada, todas as condições devem ser satisfeitas: a) deve existir uma relação de distância, b) deve existir uma relação de proximidade e c) a distância deve ser maior do que 5 e a relação deve ser do tipo A. Se isso for verificado no modelo, serão tomadas as ações: a) criação de um fato, indicando a ação de aproximar as os objetos envolvidos e b) impressão de uma mensagem para o usuário.

5.4.4.2 Sugestão de aquisição de equipamento

A regra mostrada na ***Figura 5-42***, sugere a implantação de uma esteira, entre dois equipamentos se o fluxo aumentar demasiadamente (> 100.0). Para ser disparada, deve estar presente no SE um fato que descreva uma relação de fluxo entre dois objetos. Esse tipo de fato é criado automaticamente no protótipo sempre que for efetuado o cálculo de fluxo de materiais.

```
(defrule ImplantaEsteira
       (relacao fluxo ?a1 ?a2 ?valor)
       (> ?valor 100.0)
=>
       (assert (acao “implantar esteira entre” ?a1 ?a2))
       (printout t “Precisamos implementar uma esteira na linha”)
)
```

Figura 5-42: Regra para testar a necessidade de implantação de uma esteira transportadora

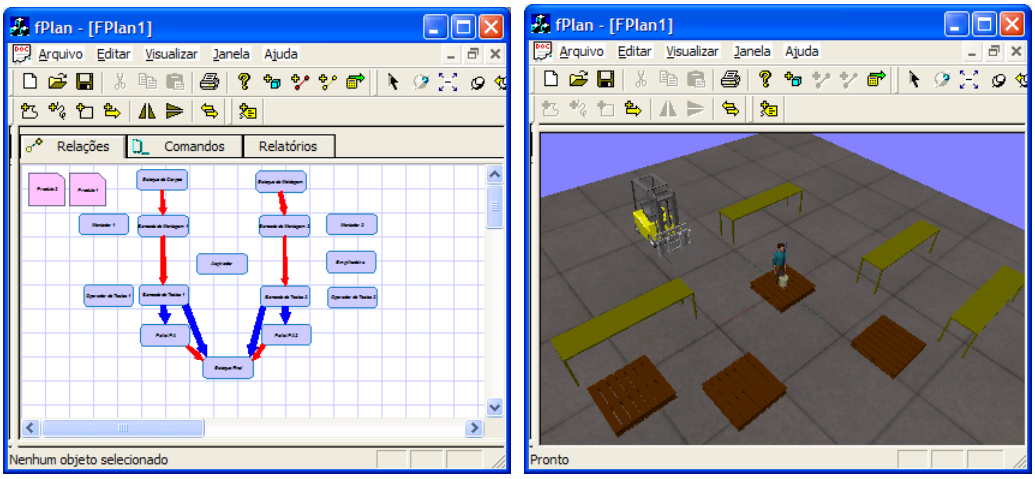
Se a parte condicional da regra for satisfeita serão executadas duas ações: a) a criação de um novo fato, registrando a ação de implantação da esteira e b) a impressão de uma mensagem para o usuário do protótipo.

5.4.5 Conclusões do uso do modelo criado no protótipo

Nos testes realizados no modelo os resultados foram satisfatórios, uma vez que a edição do arranjo físico mostrou-se simples, exigindo poucas entradas de dados.

A existência concorrente dos três modelos: o de relacionamentos (qualitativos e quantitativos), o icônico e o de regras mostrou-se adequado para a análise de vários aspectos necessários do desenvolvimento e análise de arranjo físico. As informações de fluxo da carta de-para e as relações qualitativas de proximidade puderam ser modeladas sem maiores dificuldades. Um passo além do tradicional foi a utilização do sistema de regras para avaliar se as relações de proximidade foram respeitadas.

Do ponto de vista do uso, o usuário pode optar por concentrar-se na análise das relações ou na alteração do arranjo fisico. Para isso é possível maximizar uma das janelas (***Figura 5-43***), fazer as alterações e depois verificar os efeitos consultando o sistema de regras ou recalculando os fluxos quantitativos que dependem da disposição dos objetos do arranjo.



(a) **(b)**

Figura 5-43: Protótipo pode ser usado em a) na análise lógica do arranjo ou na análise e b) geração da solução manual do arranjo.

O protótipo foi desenvolvido com o objetivo de facilitar o processo de manipulação do arranjo físico de uma maneira mais natural. Para isso foi testado em dispositivo que possibilita aos usuários mover com as mãos os objetos do arranjo, como mostrado a seguir.

5.5 Teste do protótipo com interface convergente

O sistema usado para testar a manipulação direta dos objetos do arranjo físico consistiu de um quadro branco sensível ao toque, em uma montagem simples (***Figura 5-44***). Esse quadro mapeia os toques no quadro em ações no computador conectado ao mesmo. Dessa forma, um toque na tela do quadro corresponde ao clique do botão esquerdo do *mouse*. Os efeitos das ações induzidas no computador são continuamente projetadas no quadro branco.

O quadro usado possuía dimensões de 152,4 cm x 122,6 cm da marca SmartBoard (SMARTBOARD, 2006) que exige a instalação de um programa computacional de apoio instalado no computador.

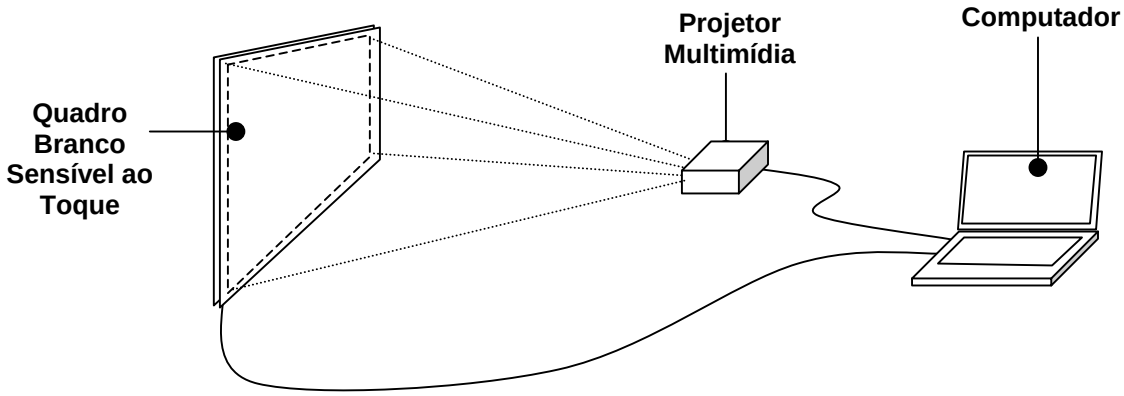


Figura 5-44: Montagem do sistema

A principal vantagem desse tipo de equipamento é uma interface com o usuário em que o foco de ação e o foco de atenção estão na mesma posição. Para fazer alterações no arranjo basta tocar sobre o objeto (***Figura 5-45***). Uma vez selecionado, o objeto pode ser arrastado até outra posição do espaço (***Figura 5-46***). Isso permite a geração de soluções de uma forma mais natural, parecida com o BUILD-IT (FJELD, 2001).

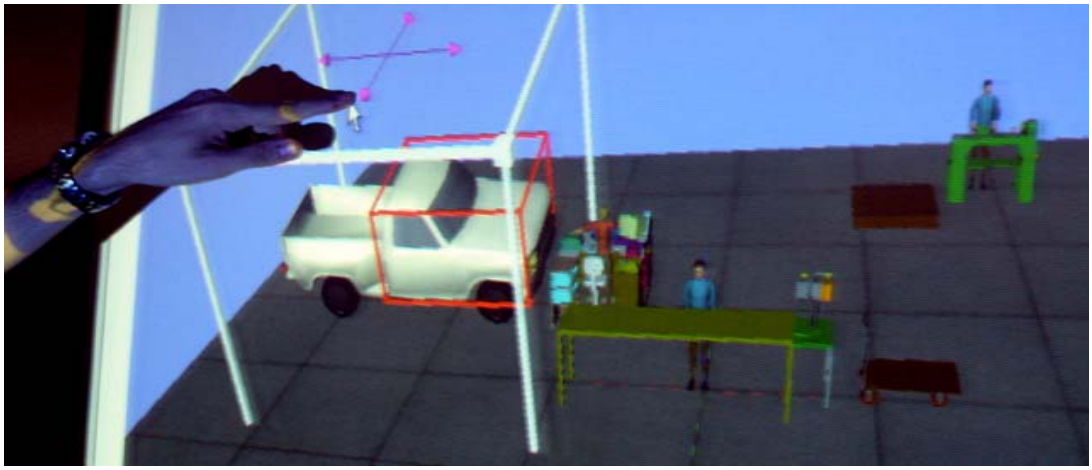


Figura 5-45: Seleção de um objeto no modelo

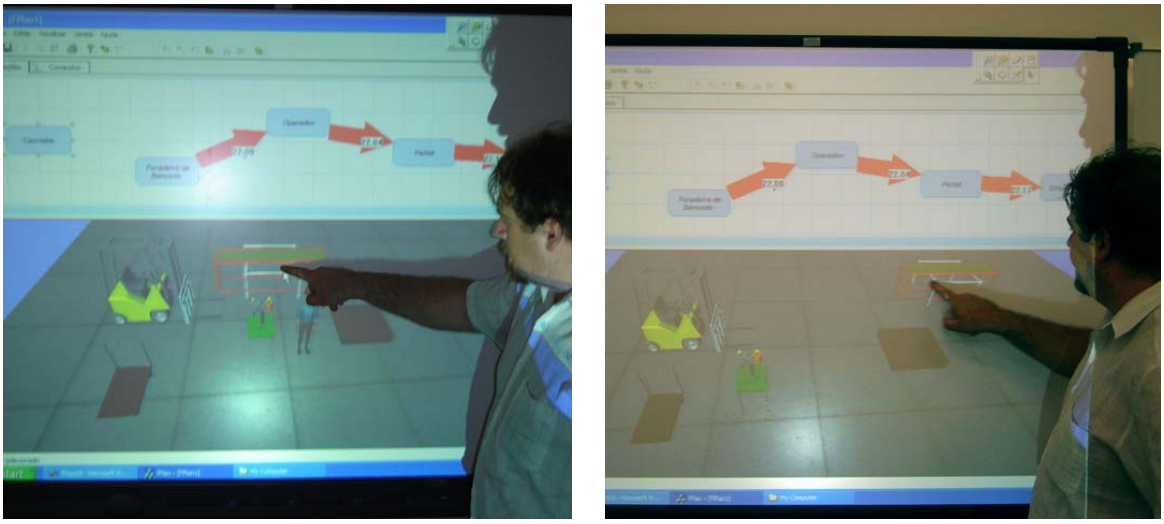


Figura 5-46: Alteração do arranjo: movendo a bancada do centro do arranjo para a direita arrastando-a com o dedo.

O seletor implementado no modelo, já disponível na plataforma OpenInventor, permite que o objeto seja deslocado ao longo dos eixos geométricos X, Y e Z, tocando em suas faces. Os vértices do cubo servem para aplicar escala ao objeto e as arestas servem para rotacioná-lo. Na ***Figura 5-47***, são mostrados alguns exemplos de interação com um manequim importado do simulador humano Jack.

(a) **(b)** **(c)**

Figura 5-47: Exemplos de manipulação de objetos: a) movimentação no plano XY; b) movimentação no eixo XZ; c) Rotação ao longo do eixo Z.

A ***Figura 5-48*** mostra um processo de discussão em que os participantes do grupo de projeto podem discutir um determinado arranjo. Além disso, podem mudá-lo, simplesmente tocando na tela e arrastando o objeto. Uma restrição nesse aspecto é a impossibilidade de executar diversas alterações simultaneamente, uma vez que o dispositivo apontador utiliza as funcionalidades do *mouse* que é apenas um. Em função disso, cada usuário deve esperar a sua vez para poder executar uma alteração do arranjo. Apesar disso, com esse tipo de interface os usuários têm a percepção de estarem atuando diretamente sobre a solução e não com um computador, o que pode permitir que mais pessoas interajam com o arranjo físico e não apenas a pessoa que opera o computador.

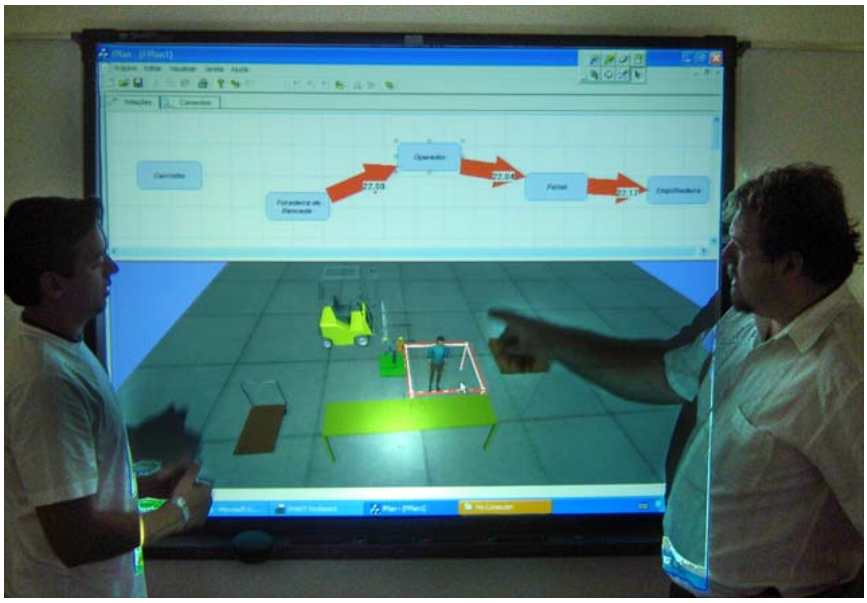


Figura 5-48: Discussão de alterações do modelo realizadas no próprio modelo

5.6 Futuros desenvolvimentos do protótipo

O protótipo desenvolvido visou testar a implementação do formalismo baseado em entidades e relacionamentos e, portanto, não incorpora todas as funcionalidades desejadas para o projeto de arranjo físico. Apesar disso, há alguns desenvolvimentos que poderão ser

implementados como expansões das classes definidas no formalismo. A seguir são apresentados alguns desses desenvolvimentos futuros.

5.6.1 Visão hierárquica e agregação

Para implementar o mecanismo do detalhamento sucessivo e também o seu oposto, o de abstração, é necessário implementar no protótipo as funcionalidades de hierarquização dos objetos. O formalismo proposto já contempla isso ao prever que objetos possam conter outros objetos. Dessa forma, é possível criar as grandes áreas correspondentes ao arranjo físico de blocos, estabelecer relacionamentos entre eles e criar o arranjo físico dos blocos (***Figura 5-49***). Em uma etapa posterior do processo, as áreas são detalhadas com a criação de objetos internamente a elas e com o estabelecimento de outras relações.

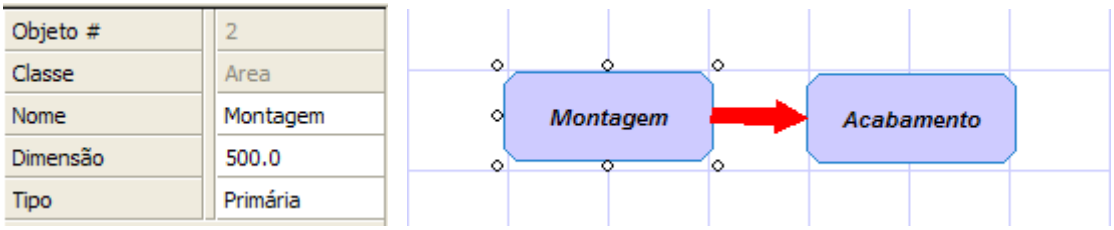


Figura 5-49: Grandes blocos são objetos abstratos como quaisquer outros.

No programa, ao se clicar duas vezes sobre um bloco, por exemplo, tem-se acesso aos seus componentes (***Figura 5-44***).

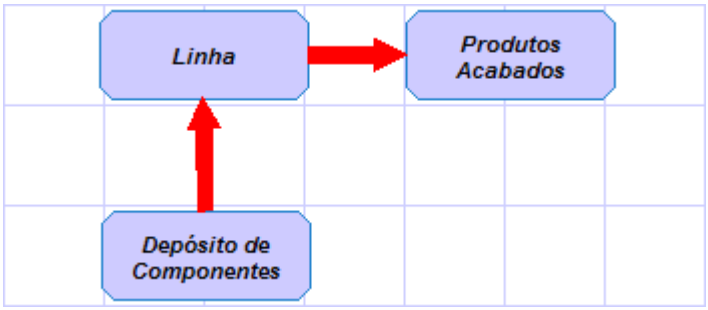


Figura 5-50:Componentes da área de *Montagem* são outras três áreas.

O estabelecimento da hierarquia prevê o estabelecimento de um mecanismo de agregação de atributos de objetos e de relações. No primeiro caso, por exemplo, os componentes de *Montagem* têm o atributo *Dimensão* marcado como agregador. Isso quer dizer que o atributo *Dimensão* do objeto pai é a soma dos atributos *Dimensão* dos seus componentes. Caso o atributo não exista no objeto-pai ele será criado. Caso ele não exista no objeto-filho ele será nulo. No exemplo, *Dimensão* de Montagem (500 m2) é a soma do mesmo atributo dos objetos-filhos *Linha* (250m2), *Depósito de Componentes* (50 m2) e *Produtos Acabados* (150 m2). Essa hierarquia deve ser mostrada no protótipo na estrutura em forma de árvore, mostrada na ***Figura 5-51***.

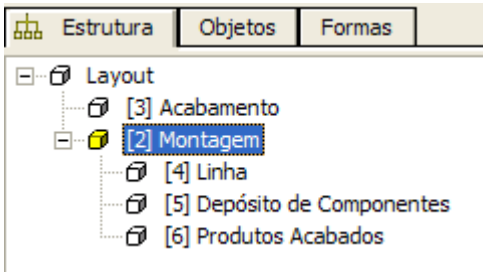


Figura 5-51: ***Árvore hierárquica dos objetos***

Da mesma forma que a agregação funciona para os objetos, deve funcionar também para as relações quantitativas (***Figura 5-52***).

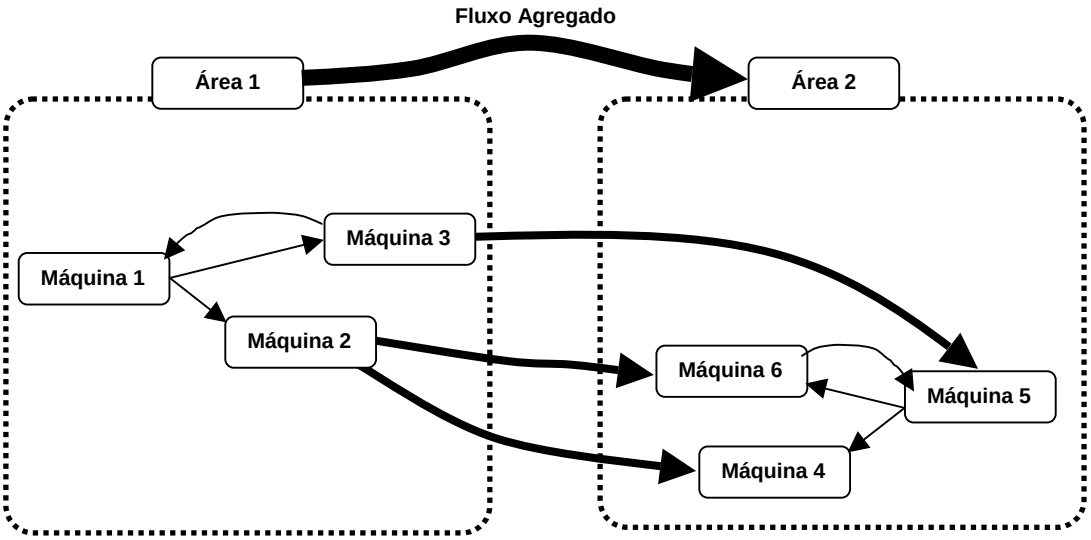


Figura 5-52: Agregação dos atributos dos fluxos

Quando é definida uma relação com essa característica de agregação, ela representa a soma (ou outra função de agregação) dos atributos das relações do nível inferior.

5.6.2 Implementação de algoritmos de otimização de arranjos fisicos

Para permitir o rearranjo automático das áreas, o protótipo deve possuir algoritmos que permitam um ajustamento do tamanho e forma dos objetos de modo a obter um melhor aproveitamento do espaço disponível (***Figura 5-53***). Tradicionalmente, esse tipo de algoritmo construtivo como o CORELAP não considerava a existência dos objetos no interior das áreas. Com a utilização de um modelo icônico detalhado isso é possível.

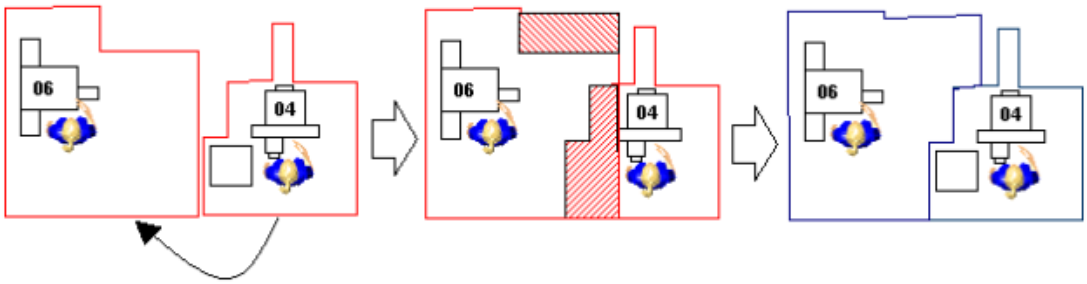


Figura 5-53: Ajuste automático de áreas

Para que isso possa acontecer de forma satisfatória o programa deve ser capaz de identificar que vários conjuntos de linhas representam as áreas e ser capaz de identificar uma sobreposição de áreas. Os programas de CADD atuais não são capazes de fazê-lo, o que exige esforço do analista de arranjo físico que deve redesenhar as áreas e recalculá-las uma a uma.

A implementação dessa funcionalidade consiste na criação de métodos na classe Objeto. No método principal, um objeto analisa sua geometria e a dos demais objetos e determina as alterações necessárias. Se as alterações forem possíveis, os objetos gráficos são

alterados para representar a alteração. Essa é uma função importante, pois pode trabalhar em conjunto com manipuladores, apresentados a seguir.

5.6.3 Implementação de manipuladores de padrão de fluxo

Os manipuladores nada mais são do que algoritmos que organizam automaticamente os objetos de um arranjo, segundo algum critério. Com os manipuladores é possível estabelecer, por exemplo, que os objetos de um determinado arranjo devem seguir um padrão de fluxo (***Figura 5-54***).

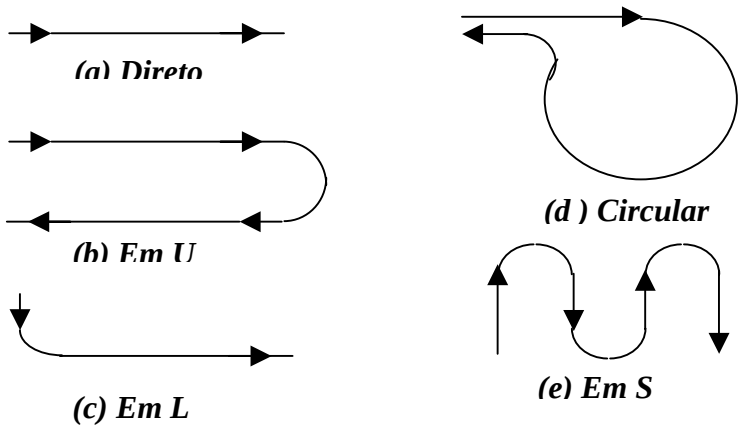


Figura 5-54: Padrões de fluxo encontrados (abstraídos) dos arranjos

Historicamente, depois do desenvolvimento do conceito de fluxo foram observados alguns padrões comparados por analogia a outras formas (como as mostradas na ***Figura 5-54***). Posteriormente o processo se inverteu: os analistas de arranjo buscaram criar seus arranjos de acordo com um dos padrões observados. A opção entre uma ou outra forma ocorre em função de vantagens também construídas juntamente com os padrões. Por exemplo, em um arranjo o fluxo em U é interessante, pois permite que a recepção de materiais fique perto da expedição. Com isso é possível juntar as duas áreas e economizar com os custos de pessoal e de controle. As ***Figura 5-55*** a ***Figura 5-57*** mostram como a classe *Manipulador*

alteraria o arranjo de acordo com um padrão desejado para o fluxo de materiais. Nesse exemplo, considerar um conjunto de objetos como sendo os postos de trabalho e um objeto *Relacionamento* contendo os fluxos de materiais entre os postos.

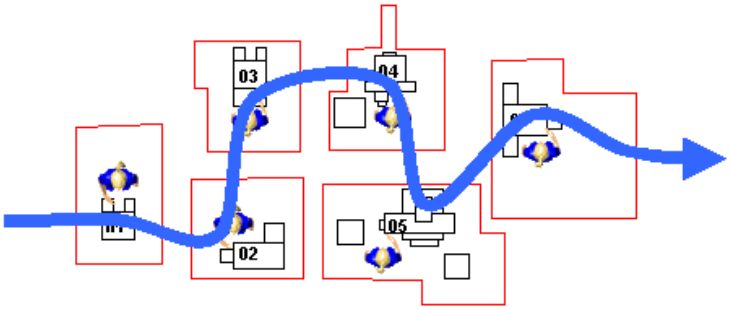


Figura 5-55: O arranjo inicial apresenta um fluxo de material irregular.

Depois de criado o arranjo inicial no protótipo, o usuário associa um *Manipulador* ao arranjo e o configura com um padrão de fluxo que considere adequado. A ***Figura 5-56*** mostra o efeito que seria obtido se o padrão linear fosse adotado.

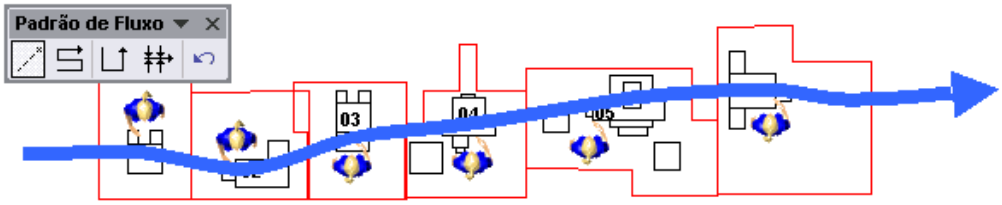


Figura 5-56: Arranjo depois de aplicado a função de linearização do fluxo

Da mesma forma um arranjo físico em U (***Figura 5-57***) pode ser obtido selecionando-se esse padrão na configuração do objeto da classe *Manipulador*. Para obter esse efeito a classe *Manipulador* deve ter acesso à seqüência de fluxo de materiais de um objeto da classe *Relacionamento* e às informações sobre a geometria dos objetos que serão manipulados.

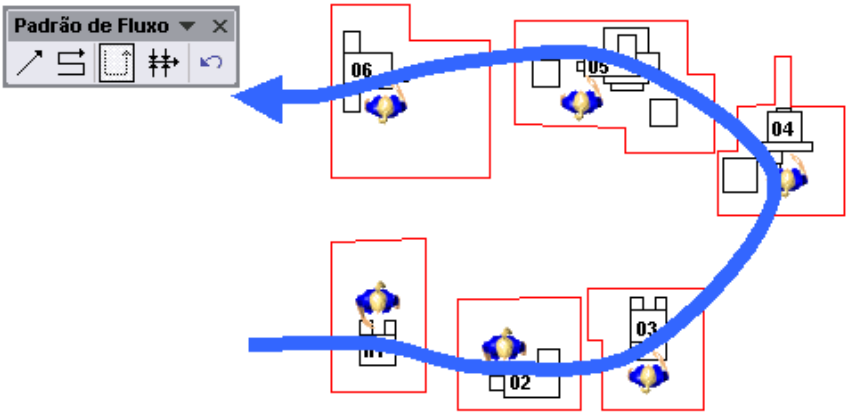


Figura 5-57: Arranjo físico depois de aplicado o padrão de fluxo em U

5.6.4 Utilização de manipuladores para a alteração dos dispositivos de manuseio

A utilização de dispositivos de manuseio de materiais semi-automáticos ou automáticos geralmente é justificada pela intensidade de fluxo de materiais entre locais na planta. Da mesma forma que o fluxo pode ser abstraído e passar a ser representado no arranjo, pode-se utilizá-lo como padrão da forma geral de um sistema automatizado de manuseio de materiais, como uma esteira, por exemplo. Dessa forma, o usuário pode solicitar a um *Manipulador* que construa um sistema de esteira, por exemplo, a partir de uma seqüência de fluxo. Isso pode ser feito sob a ação do usuário ou pode estar determinado nas regras do arranjo: “Regra: se o fluxo for superior a 10000 unidades transforme o fluxo em um sistema de esteira”. Assim, a partir do estado da ***Figura 5-57***, será obtido um resultado como o mostrado na ***Figura 5-58***.

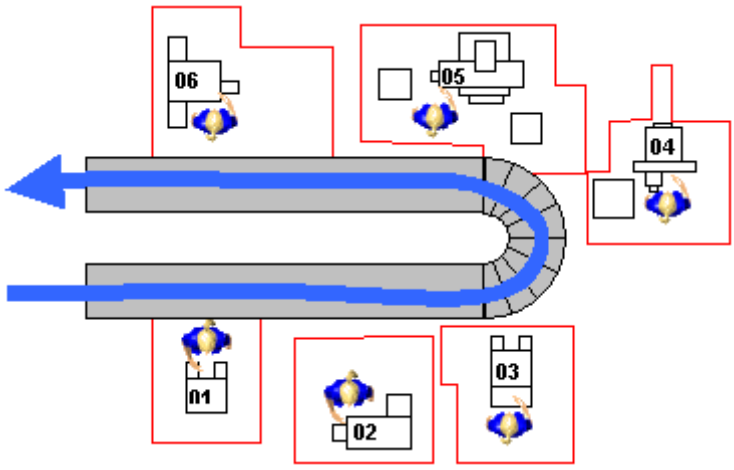


Figura 5-58: Um manipulador pode ser construído para transformar um relacionamento de fluxo de materiais em sistemas de manuseio de materiais.

5.6.5 Módulo para análise ergonômica

Da mesma forma que os relacionamentos são encapsulados em classes específicas, as funcionalidades de análise dos simuladores humanos podem ser encapsuladas em um conjunto de classes. Esse módulo é fundamental para um sistema que pretenda avaliar arranjo físico, pois o trabalho é fator preponderante na determinação do arranjo em muitos casos. Esse módulo também pode ser derivado da classe CDigrafo para modelar as ações de trabalho a serem executadas pelo manequim.

5.6.6 Relações multidimensionais: o conceito de campo de influência

As relações que podem existir nos arranjos físicos não seguem, necessariamente, a forma de uma linha, como no caso de troca de materiais, por exemplo. A influência de uma área de atividade ou simplesmente de um equipamento pode se dar em todas as direções, definindo uma área ou volume afetado por aquela influência. Nessa nova modalidade de relacionamento entre áreas de atividade, a influência deixa de ser binária (estabelecida apenas entre dois elementos) e passa a se estender por todos os elementos espalhados em um campo de influência. Exemplos típicos são o ruído, calor e iluminação. Para permitir a representação desses fatores, é proposto o conceito de campo de influência.

A cada ponto do espaço (bi ou tridimensional) influenciado pelo campo, associa-se uma quantidade ou intensidade através da definição de um valor e de uma função de atenuação. A intensidade do valor global para um determinado tipo de campo em um determinado ponto é o resultado da consideração dos vários campos colocados no arranjo físico. Assim, por exemplo, pode-se avaliar a criticidade de um determinado local em termos de calor, vibração, ruído, existência ou não de extintores de incêndio, poeira etc. A função de atenuação pode ter várias definições como, por exemplo, linear, exponencial, senoidal (***Figura 5-59***) etc. O raio de alcance do campo depende dessa função de amortecimento escolhida ou de um raio-limite.

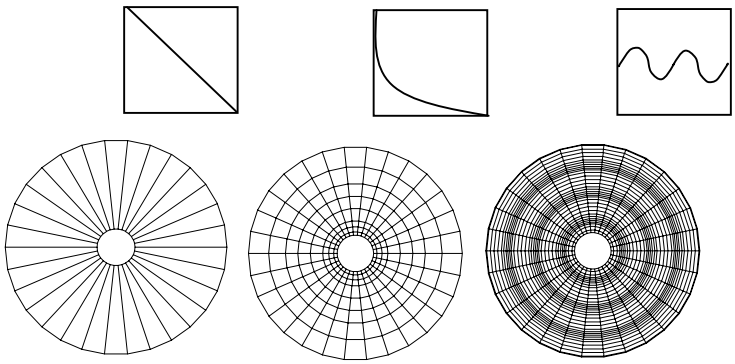


Figura 5-59: Alguns tipos de campo: a) linear, b) exponencial negativo e c) senoidal.

Os campos podem também assumir outras formas como as poligonais, cônicas etc. Assim como servem para determinar a presença de objetos como extintores de incêndio, os campos podem ser usados no projeto do posto de trabalho, ao permitirem que se analise a presença de objetos ao alcance do operador ou do seu campo visual. Isso poderia ser feito utilizando relacionamentos mas implicaria na necessidade de explicitar cada um dos relacionamentos. Além disso, permite que sejam analisadas as interferências entre os postos de trabalho, como mostrado na ***Figura 5-60***.

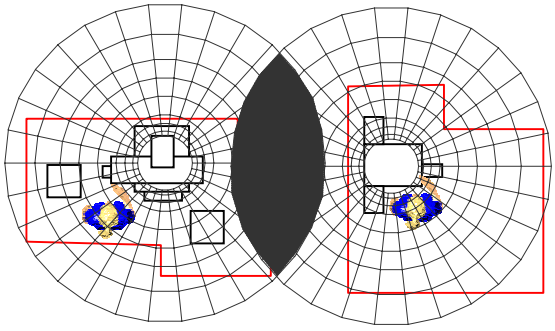


Figura 5-60: Interferência entre campos de influência.

5.6.7 Um editor visual de regras

No estágio atual de desenvolvimento as regras devem ser editadas manualmente em um editor de textos para serem carregadas no sistema especialista ou digitadas diretamente no *prompt* de comandos. Isso é um empecilho grande, pois dificulta sobremaneira o uso, mesmo por parte de pessoas acostumadas com a sintaxe das regras. Para superar isso, o protótipo deve possuir um editor visual de regras que facilite a visualização e edição dessas regras. Basicamente o editor deve possibilitar acesso aos objetos e seus atributos, bem como aos demais condicionantes do modelo, bem como a ações como o acionamento de um *Manipulador*.

5.6.8 Simulação de eventos discretos

Uma forma popular para implementação de simuladores de eventos discretos é o uso de redes de filas, como no caso de programas como o Arena e GPSS/H (SCHRIBER, 1990). Nessa abordagem, as entidades que representam produtos, informações, pessoas etc. circulam por um grafo constituído por nós onde existem blocos de decisão. Alguns desses blocos possuem filas para manter as entidades enquanto estão em execução e em que há necessidade de aguardar a passagem de tempo ou a satisfação de uma determinada condição. A ***Figura 5-61*** mostra uma possível implementação disso na vista de relacionamentos do protótipo.

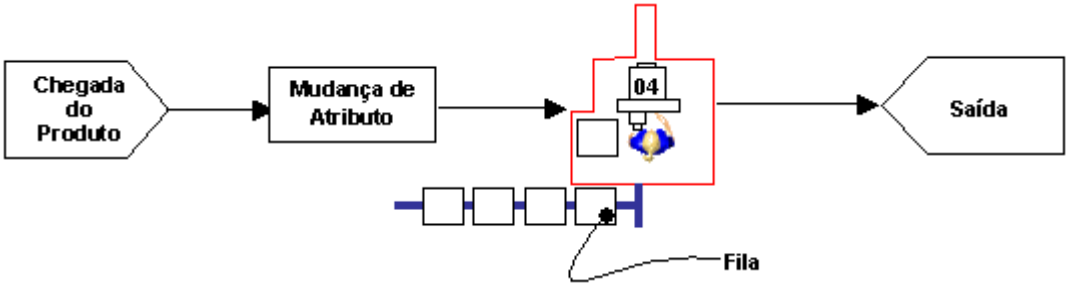


Figura 5-61: Implantação de uma classe para execução de simulação de processos discretos.

No grafo usado para essa implementação, alguns objetos abstratos criam entidades ou outros objetos que vão passando por uma série de operações lógicas, alterando o estado do modelo. Os arcos dos grafos representam o encadeamento lógico do modelo de simulação. No exemplo, uma dessas operações é a criação, em *Mudança de Atributo*, de um atributo no produto criado no objeto *Chegada do Produto*. A seguir, na Máquina 04, há a execução de uma operação de transformação que faz com que a entidade fique retida durante um período. Durante esse tempo, a entidade é colocada em uma fila. Finalmente, o produto criado é retirado da fila e enviado para ser eliminado do modelo no objeto abstrato *Saída*.

O caminho natural para o desenvolvimento do módulo de simulação de eventos discretos é a derivação da classe *CDigrafo*. Com isso, será possível utilizar as funções de análise de grafos para identificar erros na lógica do modelo, implementada como uma rede de objetos lógicos associados a filas, determinar as menores distâncias temporais pela rede etc. Depois dessa implementação, o caminho natural é implementar funções de animação a essa nova classe.

Uma questão importante com a implementação desse módulo é a consideração do uso de simulação distribuída. Para isso é necessário considerar a adoção de uma estrutura de organização de modelos como a *High Level Architecture*, HLA (CALVIN & WETHEARLY, 2006).

6 CONCLUSÕES

O formalismo proposto rompe com a tradição seqüencial prescritiva do projeto tradicional de arranjo físico. Pressupõe que o desenvolvimento de arranjo físico ocorre em grupos participativos, com a ocorrência de atividades desestruturadas e onde mundos-objetos negociam para manifestar parte de sua visão. A geração das alternativas de forma individual sob os condicionantes de vários mundos-objetos é importante para o enriquecimento da solução gerada. Cada mundo-objeto possui as ferramentas e técnicas capazes de explicar as soluções para pessoas que o compartilham. Ao mesmo tempo, permite a geração articulada de soluções segundo seus condicionantes.

Cada mundo-objeto ao entrar em contato com uma outra solução estruturada pode estabelecer um diálogo em que as diferenças podem explicitar pontos críticos importantes e que podem ser tratados de maneira preventiva.

As ferramentas de arranjo físico assumem o papel de meio comunicativo da solução além daquele de meio construtivo. Essas ferramentas devem ser fáceis de usar e devem procurar eliminar as barreiras ao uso representadas no uso de um computador em um projeto participativo. As novas tecnologias como a realidade virtual e a realidade aumentada podem contribuir decisivamente para o estabelecimento desse tipo de ferramenta.

O papel das ferramentas de arranjo físico é o de permitir a explicitação pelo menos parcial dos reveses existentes entre as concepções que estarão operando o sistema real, antes que esses reveses impliquem em fracassos e acidentes.

O formalismo desenvolvido mostrou-se adequado ao definir uma estrutura básica sobre a qual podem ser desenvolvidos programas computacionais de projeto de arranjo

físico. O protótipo desenvolvido permitiu a implantação das necessidades levantadas e que constituem o cerne da ferramenta. Os futuros desenvolvimentos apontados para o protótipo apontam para uma série de pesquisas a serem desenvolvidas, visando o desenvolvimento do formalismo e do entendimento do processo de projetação do arranjo físico:

a) o uso da abstração permite estudar o desenvolvimento das soluções ao longo do processo de detalhamentos sucessivos. Várias questões podem ser levantadas com relação a isso como:

   i. qual deve ser o nível de detalhamento de uma solução para que os resultados possam ser avaliados?

   ii. como dividir as tarefas entre os participantes do grupo de projeto trabalhando à distância com uma ferramenta computacional?

   iii. Como conciliar as alterações feitas em níveis diferentes de abstração?

b) a implementação de algoritmos de otimização requer esforços de pesquisa e desenvolvimento que:

   i. permitam a manipulação dos elementos gráficos do arranjo fisico;

   ii. o uso de algoritmos de corte e empacotamento que considerem as três dimensões e os detalhes dos objetos manipulados;

   iii. o desenvolvimento de métodos otimizantes e heurísticas que possam considerar dados qualitativos e regras além dos dados quantitativos;

c) a implementação de manipuladores de padrão de fluxo e de dispositivos de manuseio requer os avanços apontados no item anterior, além de requerer o desenvolvimento de algoritmos para reconhecimento de padrões;

d) o desenvolvimento de um módulo de análise ergonômica, além das características usuais desse tipo de programa, pode contribuir para futuras pesquisas ao possibilitar:

i. a consideração de regras que definirão as ações que o manequim adotará em cada etapa da sua atividade de trabalho;

ii. o desenvolvimento de um manequim inteligente que pode decidir qual tarefa deve ser executada, com base no estado do modelo. Por exemplo, o manequim pode alterar o momento de execução de uma determinada tarefa em função do tamanho de uma fila de espera, por exemplo;

iii. o desenvolvimento de estudos que permitam identificar a viabilidade de implementação de relacionamentos entre diversos manequins que podem utilizar estratégias de colaboração, competição, aceleração do ritmo de trabalho etc.

e) o desenvolvimento de um editor visual de regras necessita de uma análise dos tipos de composição que podem ser utilizadas pelo usuário do sistema, o que requer uma interface flexível e a discussão das formas das próprias regras. Esse editor deve permitir a criação de regras genéricas, como “todas as máquinas serão desligadas” e vagas como “talvez chova”.

f) a implementação de simulação de eventos discretos no contexto do formalismo poderá contribuir para o desenvolvimento de um simulador que opere com valores quantitativos, qualitativos e regras e que possa operar simultaneamente em níveis de abstração diferentes.

Além dessas áreas de desenvolvimento, sugere-se a implementação das funcionalidades do protótipo, segundo a lógica preconizada no formalismo de uma ferramenta baseada em realidade virtual, preferencialmente com possibilidades de imersão e em sistemas distribuídos para permitir o trabalho em grupo à distância. Isso certamente contribuirá para o aperfeiçoamento das técnicas de manuseio de arranjo físico.

7 REFERÊNCIAS

ABDOU, G.; DUTTA, S.P. An integrated approach to facilities layout using expert systems. **International Journal of Production Research**, No. 28, p. 685-708, 1990.

ABREU, A.L.T. **Explorando o relacionamento entre as medidas de desempenho na ALCOA Alumínio de Poços de Caldas**. São Carlos, 2004. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia de Produção, UFSCar.

AFENKATIS, P. A loop layout design problem for flexible manufacturing systems. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, n. 1, pp.175-196, 1989.

ALEISA, E.E.; LIN L. For effective facilities planning: layout optimization then simulation, or vice versa? In: 2005 Winter Simulation Conference, 2005. **Anais...**, 2005. Disponível em: <http://www.inform-cs.org>. Último acesso em: 12/dez/2006.

APPLE, J.M. **Plant layout and material handling**. Wiley, 3rd. ed., 1977.

_____; DEISENROTH, M.P. A computerized plant layout analysis and evaluation technique (PLANET). In: AIIE Technical Papers, 33., 1972, Anaheim, Calif. **Anais...**1972.

ARAÚJO, C.S. **Acquisition of product development tools in the industry : a theoretical contribution**. Department of mechanical engineering. Technical University of Denmark, 2001. Tese (doutorato). 199p.

_____; An investigation of the use of design methods. In: International congress of industrial engineering, 2.,1996, Santa Bárbara d'Oeste, Brasil. **Anais…**Santa Bárbara d'Oeste: UNIMEP, 1996.

ARENA. **Arena user's guide**. Rockwell Software Inc, 2005.

ARINZE, B.; BANERJEE, S.; SYLLA, C. A Methodology for knowledge based decision support for facilities layout planning. In: **Computers and Industrial Engineering**, n. 17, p. 31- 36, 1989.

AUTODESK **AutoCAD**. Disponível em: <http://www.autodesk.com>. Acesso em: 01 mar. 2006.

AZUMA, R., BAILLOT, Y., BEHRINGER, R., FEINER, S., JULIER, S., MACINTYRE, B. Recent Advances in Augmented Reality. In: **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 21, n. 6, nov/dec 2001, p. 34-47.

BABU, A.J.G.; YAO, D. An expert facility layout system: an object-oriented approach. In: **International Journal of Computer Applications in Technology**. n. 9, p. 131-143, 1996.

BADIRU, A.B.; ARIF, A.A. FLEXPERT: Facility layout expert system using fuzzy linguistic relationships codes. In: **IIE Transactions**, v. 2, n. 28, p. 295-308, 1996.

BADLER, N.I.; PHILLIPS, C.B.; WEBBER, B.L. **Simulated Humans: Computer Graphics Animation and Control.** New York: Oxford University Press, 1993.

BALAKRISHNAN, J.; JACOBS, F.R.; VENKATARAMANAN, M.A. Solutions for the constrained dynamic facility layout problem. In: **European Journal of Operational Research**. North Holland, n. 57, 1992, p.280-286.

BANKS, J. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. New York: John Wiley and Sons; 1998; 849p.

_____; CARSON II, J. S. **Discrete-Event System Simulation**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.

_____; NORMAN, V. Simulation of Manufacturing and Material Handling Systems. In: Congresso Internacional de Engenharia Industrial, 2, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: UNIMEP, 1996.

BAZARAA, M.S. Computerized layout design: a branch and bound approach. In: **AIIE Transactions**, v. 7, n. 4, 1975, p. 432-437.

BELL, B.; FEINER, S.; HÖLLERER, T. View Management for Virtual and Augmented Reality In: ACM Symp. on User Interface Software and Technology, Orlando, 2001. **Anais...** Orlando, FL, november 11-14, 2001, pp. 101-110.

BENEVOLO, L. **História da Cidade**. São Paulo: Perspectiva, 2005. 728 p.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I.; **UML: Guia do Usuário**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 2. ed. 474 p.

BOSWELL, S.G. TESSA: A new greedy heuristic for facilities layout planning. In: **International Journal of Production Research**. v. 30, n. 8, p. 1957-1968, 1992.

BOZER, Y.A.; MELLER, R.D.; ERLEBACHER, S.J. An improvement- type layout algorithm for single and multiple-floor facilities. In: **Management Science**, v. 40, n. 7, Jul., 1994, p. 918-932.

BRAZ, J.; FERREIRA, J. TARCAST: Uma Taxonomia para Sistemas de Realidade Aumentada. In: Encontro Português de Computação Gráfica, 13, Vila Real, Portugal. **Anais...** 2005. Vila Real: Universidade de Trás os Montes e Alto Douro.

BROOKS. **Simulation and Modeling Software**. Disponível em: <http://www.brookssoftware. com/pages/ 67_simulation_and_modeling.cfm>. Último acesso em: 12/dez/2006.

BUCCIARELLI,L.L. Project oriented learning as part of curriculum development In: Industrial Ecology NTVA- Seminar and Workshop, 3., Trondheim,1998. **Anais...**, 1998. Disponível em: <http://www.indecol.ntnu.no/indecolwebnew/publications/articles/1/NTVA98ProjectBucciarelli.pdf>. Último acesso em: 29/ou/2006

_____; **Designing Engineers**. Cambridge, Massachussets: MIT Press. 1994.

_____; An ethnographic perspective in engineering design. In: **Design Studies**, n. 9, p. 159-168, 1988.

BUFFA, E.S.; ARMOUR, G.C.; VOLLMANN, T.E. Allocating facilities with CRAFT. In: **Harvard Business Review**, v. 42, n. 2, 1964, p. 136-158.

BURKARD, R.E. Quadratic assigment problems. In: **European Journal of Operational Research**. n. 15, 1984, p.283-289.

_____; RENDL, F. A thermodynamically motivated simulation procedure for combinatorial optimization problems. In: **European Journal of Operational Reserach**, n. 17, 1984, p. 169-174.

BURNS, C.M.; VICENTE, K.J. A participant-observer study of ergonomics in engineering design: how constraints drive design process. In: **Applied Ergonomics**, n. 31, 2000, p. 73-82.

CALVIN, J.O.; WETHEARLY, R.. **An introduction to the high level architecture (HLA) runtime infrastructure (RTI)**. Disponível em: < http://dss.ll.mit.edu/dss.web/96.14.103.RTI.Introduction.ps>. Último acesso em 12/dez/2006.

CAMAROTTO, J.A. **Estudo das relações entre o projeto de edifícios industriais e a gestão da produção**. São Paulo, 1998. 246p. Tese (Doutorado). São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP.

CAMP, D. J. van; CARTER, M.W.; VANELLI, A. A nonlinear optimization approach for solving facility layout problems. In: **European Journal of Operational Research**, n. 57, p.174-189, 1992.

CHEN, P. **Gerenciamento de banco de dados: a abordagem entidade-relacionamento para projeto lógico**. São Paulo: McGraw-Hill: Newstec, 1990.

CHHAJED, D.; MONTREUIL, B; LOWE, T.J. Flow network design for manufacturing systems layout. In: **European Journal of Operational Research.** Amsterdan: Elsevier, n.57, p. 145-161, 1992.

CHIANG, W.-C.; CHIANG, C. Intelligent local search strategies for solving facility layout problems with the quadratic assignment problem formulation. In: **European Journal of Operational Research**. Amsterdan: Elsevier, n. 106, p. 457-488, 1998.

_____; KOUVELIS, P. An improved tabu search heuristic for solving facility layout design problems. In: **International Journal of Production Research**, 1994.

CHUNG, Y.-K. Application of a cascade BAM neural expert system to conceptual design for facility layout. In: **Computers and Mathematics with Applications**. n. 37, pp. 95-110, 1999.

CIMTECHNOLOGIES **FactoryFLOW: Plant layout and Material Handling Analysis within AutoCAD**. Ames, Iowa: Cimtechnologies Corporation, 1995.

CORIAT, B. **Pensar pelo avesso: o modelo japonês de trabalho e organização**. Rio de Janeiro: Revan : UFRJ, 1994, 209 pp.

COSTA, M.A.B. **Um modelo baseado em conhecimento para simular rebanhos de bovinos de corte**. Campinas, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, 2004.

COX, E. **Fuzzy Systems: theory and applications**. Academic Press, 1994.

CRIMBO CRIMFLO: **Progiciel d´Aménagement d´Usine**. Victoriaville: Cégep. Disponível em http://www.cgpvicto.qc.ca/crimbo/logiciel.htm. Acesso em: 01 dez. 2001.

DAVIS, W.J. Looking into the future of Simulation. In: **IIE Solutions**, May 1998, pp. 24-30.

DECCA, E. S. **O Nascimento das Fábricas**. São Paulo: Ed. Brasiliense, Série Tudo é História, 10a. ed., 1995, 77p.

DEITEL, H.M.; DEITEL, P.J. **C++ Como programar: apresentando projeto orientado a objeto com UML**. Porto Alegre: Bookman, 3a. ed., 2004, 1098p.

DEJOURS, C. **O fator humano**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2003, 104p.

DELMIA. **DELMIA Process Engineer: A Process Driven Approach to Process and Resource Planning**. Disponível em: <http://www.delmia.com/gallery/pdf/ Process_Engineer.pdf>. Último acesso em: 12/dez/2006.

DENG, Y.-M.; BRITTON, G.A.; TOR, S.B. Constraint-based functional design verification for conceptual design. In: **Computer-Aided Design**, n. 32, 2000, p. 889-899.

DONAGHEY, C.E. **BLOCPLAN: layout design system**. Houston: Industrial Engineering Department, University of Houston, 1986.

DUTTA, K.N.; SAHU, S. A multigoal heuristic for facilities design problem: MUGHAL. In: **International Journal of Production Research**. n. 20/2, 1982, pp. 147-154.

EDWARDS, H.K.; GILBERT, B.E.; HALE, M.E. Modular allocation technique (MAT). In: **Management Science**, v. 17, n. 3, 1970, pp. 161-169.

EGBELU, P.J.; TANCHOCO, J.M.A. Potential for bi-directional guide-path for automated guided vehicle based systems. In: **International Journal of Production Research**, n. 24, p. 1075-1097; 1986.

FARREL, K. **Kinematic Human Modeling and Simulation Using Optimization-Based Posture Prediction**. Dissertação (Mestrado). Iowa City, 2005, 93p. The University of Iowa.

FJELD, M.; BICHSEL, M.; RAUTERBERG, M. BUILD-IT: Intuitive plant layout mediated by natural interaction. In: **Arbete Människa Miljö & Nordisk Ergonomi (Work, Human being, Environment)**. pp. 49-56, 1999.

FORRESTER, Jay W. **Industrial dynamics**. Portland: Productivity Press, c1961. 464 p.

FOULDS, L.R. Layout Manager: A Microcomputer-based decision Support System for Facilities Layout. In: **Decision Support Systems**, n. 20, p. 199-213, 1997.

_____. Techniques for facilities layout: deciding wich pair of activities should be adjacent. In: **Management Science**, v. 29, n. 12, pp.1414-1426; 1983.

_____; GIBBONS, J.W.; GIFFIN, J.W. Graph Theoretic Heuristics for the Facilities Layout Problem: an Experimental Comparison. In: **Operations Research,** n. 33, p. 1091-1106; 1985.

_____; GIFFIN, J.W.; A Graph Theoretic Heuristic for Minimizing Total Transportation Cost in Facilities Layout. In: **Journal of Operational Research**, n. 23, p. 1247-1257; 1985.

FRANCIS, R.L.; WHITE, J.A. **Facility layout and location: an analytical approach**.Englewood Cliffs : Prentice-Hall Inc, 1974.

GARRIGOU, A.; THIBAULT, J.-F.; JACKSON, M.; MASCIA, F.;Contributions et démarche de l'ergonomie dans les processus de conception; In: **Pistes**, v. 3, n. 3; oct., 2001.

GASKINS, R.J.; TANCHOCO, J.M.A. Flow path design for automated guided vehicles systems. In: **International Journal of Production Research**. n. 25, pp. 667-676, 1987.

_____; TANCHOCO, J.M.A.; TAGHABONI, F. Virtual flow paths for free ranging automated guided vehicles systems. In: **International Journal of Production Research**. n. 27, pp. 91-100, 1989.

GIARRATANO, J. C.; RILEY, G. **Expert systems: principles and programming**. 3 ed. Boston: PWS, 1998. 597 p.

GIFFIN, J.W.; FOULDS, L.R. Facilities layout generalized model solved by n-boundary shortest path heuristics. In: **European Journal of Operational Research**, n. 28, p. 382-391; 1987.

GIL, J.N.C.; HIRATA, C.; XACDML eXtensible ACD Markup Language In: Annual Simulation Symposium ACM/IEEE/SCS, 36., Orlando, **Anais…**2003.

GOETSCHALCKX, M. An interactive layout heuristic based on hexagonal adjacency graphs. In: **European Journal of Operational Reasearch**, n. 63, pp. 304-321, 1992

_____; PALLIYIL, G. A Comprehensive Model for the Concurrent Determination of Aisles and Load Stations for Aisle-Based Material Handling Systems. In **Developments in Material Handling Research**. Charlotte: Material Handling Institute of America . 1994, pp. 161-188.

GOPALAKRISHNAN, B; WENG,L.; GUPTA,D.P. Facilities design using a split departmental layout configuration. In: **Facilities**. MCB University Press, v. 21, n. 3/4, 2003, pp.66-73

GOVERNO DO CANADÁ. **National Research Council Canada: Institute for Information Technology**. Disponível em: <http://iit-iti.nrc-cnrc.gc.ca/projects-projets/fuzzyclips_e.html>. Último acesso em: 13/dez/2006.

GRAJO, E.S.; BOZER, Y.A. **LayOPT®: A data driven facilities layout optimization system for engineers**. PMC – Production Modeling Corporation, LayOPT Tech Report, 1997.

HACKER, W. Action regulation theory and occupational psychology. Review of German empirical research since 1987'. In: **The German Journal of Psychology**, v. 18, n. 2, 1994, pp. 91-120.

HALL, C.S.; LINDZEY, G.; CAMPBELL, J.B. **Teorias da personalidade**. Porto Alegre: ArtMed Editora, 2000, 591 pp.

HARHALAKIS, G.; LU, T.; MINIS, I; NAGI, R. A practical method for design of hybrid-type production facilities. In: **International Journal of Production Research**, 1996.

HARREL, C.H.; TUMAY, K. **Simulation made easy: a manager´s guide**. Norcross: Management Press, 1995.

HASSAN, K.M.D.; HOGG,G.L. A Review of Graph Theory Application to the Facilities Layout Planning. In: **Omega**, n. 15, pp. 291-300, 1987.

_____; HOGG, G.L.; SMITH, D.R. SHAPE: A construction algorithm for area placement evaluation. In: **International Journal of Production Reasearch**, n. 24, p. 1283-1295; 1986

HATCH, M.J. **Organization theory**. Oxford: Oxford Press, 1996.

HEATON, L. Designing work. Situating Design Objects in Cultural Context. In: **Design Studies**, v.2, n. 2; 2002. Disponível em: <http://jdr.tudelft.nl/main_2002.html>. Último acesso em: 12/dez/2006.

HERAGU, S.S. Recent Models and Techniques for Solving the Layout Problem. **European Journal of Operational Research** . Amsterdan: North-Holland, n. 57, 1992, pp. 136-144.

_____; ALFA, A.S. Experimental analysis of simulated annealing based algorithms for the layout problem. **European Journal of Operational Research**. Amsterdan: North-Holland., n. 57, 1992, pp. 190-202.

_____; KUSIAK, A. Machine Layout Problem in Flexible Manufacturing Systems. **Operations Research**, n. 36 , 1988, p.258-268.

HICKS, P.E.; COWAN, T.E. CRAFT-M for layout rearrangement. **Industrial Engineering**, v. 8, n. 5, 1976, pp. 30-35.

HILLIER, F.S.; CONNORS, M.M. Quadratic assignment problem algorithms and the location of indivisible facilities. **Management Science**, v. 13, n. 1, 1966, p. 42-57.

HIRSCHFELD, H. **Planejamento com PERT-CPM e analise do desempenho: metodo manual e por computadores eletronicos aplicados a todos os fins - construcoes civis, marketing etc**. 8 ed. Sao Paulo: Atlas, 1985. 335 p.

HOLTZ, F.; **LISP: the language of artificial intelligence**. Blue Ridge Summit: TAB Books, 1985, 163 p.

IMMER, J.R. **Layout planning techniques**. New York: McGraw-Hill, 1950.

IQBAL, M.; HASHMI, M.S.J. Design and analysis of a virtual factory layout. **Journal of materials processing technology**. n. 118, 2001, pp.403-410.

ISEESYSTEMS. **Stella Education**. Disponível em: <http://www.iseesystems.com/softwares/Education/StellaSoftware.aspx>. Último acesso: 12/dez/2006.

JOHNSON, R.V. SPACECRAFT for multi-floor layout planning. **Management Science**, v.28, n. 4, 1982, pp. 407-417.

KALOS, M. H.; WHITLOCK, P. A.. **Monte Carlo methods**. New York: Wiley-Interscience, 1986. v.1. 186 p.

KAKU, B.K.; RACHAMADUGU, R. Layout design for flexible manufacturing systems. **European Journal of Operational Research.** Amsterdan: North-Holland. n. 57, 1992, p. 224-230.

KIENBAUM, G., PAUL, R.J. H-ACD: Hierarchical activity cycle diagrams for objectoriented simulation modelling, In: Proceedings of the Winter Simulation Conference. New Yoor, 1994 **Anais…** New York: SCS. 1994. p.600-610.

KOCHHAR, J. S.; FOSTER, B. T.; HERAGU, S. S. HOPE: A genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. **Computers Operations Research**, v. 25, 7/8, p. 583-594, 1998.

KONZ, S. **Facility design**. New York: John Wiley & Sons, 1985.

KOOPMANS, T.C.; BECKMAN, M. Assignment problems and the location of economic activities. **Econometrica**, n. 25, v. 1; p. 53-76; 1957.

KOUVELIS, P.; CHIANG, W.-C.; FITZSIMMONS, J. Simulated annealing for machine layout problems in the presence of zoning constraints. **European Journal of Operational Research**. Amsterdan: North-Holland., no. 57, 1992, p.203-223..

_____; KIRAN, A.S. The Plant Layou Problem in Automated Manufacturing Systems. **Annals of Operations Research**. n. 26, 1990, pp. 397-412. 1990

KRUGLINSKI, D. J.; SHEPHERD, G.; WINGO, S. **Programming Microsoft Visual C++**. 5 ed. Washington: Microsoft, 1998. 1153 p

KUMARA, S.R.T.; KASHYAP, R.L.; MOODIE, C.L. Application of expert systems and pattern recognition methodologies to facilities layout planning. **International Journal of Production Research**, no. 25, pp. 905-930, 1988.

LAMONDE, F.; VIAU-GUAY, A.; BEAUFORT, P.; RICHARD, J.-G. La mémoire de projet: véhicule d'intégration de l'ergonomie et de la SST à la conception? **Pistes**, vol. 3, no. 2, octobre 2001.

LEE, R.C.; MOORE, J.M. CORELAP-Computerized relationship layout planning. **Journal of Industrial Engineering**. v. 18, n. 3, 1967, pp. 195-200.

LEUNG, J. A Graph-Theoretic Heuristic for Designing Loop-Layout Manufacturing Systems. **European Journal of Operational Research**, no. 57, 1992, pp.243-252.

LÉVY, P. **O que é o virtual?** São Paulo: Editora 34, 2005, 157 pp.

LOVE, T. Design as a social process: bodies, brains and social aspects of designing. **Journal of Design Research**. v. 3, n.1, 2003.

MAK, K. L.; WONG, Y. S.; CHAN, F.T.S. A genetic algorithm for facility layout problems. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 11, n. 1-2, pp. 113-127, 1998.

MARKT, P. L.; MAYER, M. H. WITNESS simulation software: A Flexible Suite of Simulation Tools. In: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference; p. 711-717, 1997. **Anais...** 1997.

MATSUZAKI, K.; IROHARA, T.; YOSHIMOTO, K. Heuristic algorithm to solve the multi-floor layout problem with the consideration of elevator utilization. **Computers and Industrial Engineering**, n. 36, p. 487-502, 1999.

MAXWELL, W.L.; MUCKSTADT, J.A. Design of automated guided systems. **IIE Transactions**, n. 14, p. 114-124; 1982

MAXWELL, W.L.; WILSON, R.C. Dynamic network flow modelling of fixed path material handling systems. **AIIE Transactions**, n. 13, p. 12-21; 1981

MECKLENBURGH, J.C. **Plant layout: a guide to the layout of process plant and sites.** Aylesbury: Leonard Hill Books, 1973.

MENEGON, N.L. ; COSTA, M.A.B. da ; TORRES, I. ; CAMAROTTO, J. A ; COSTA, R. A simulação de sistemas como ferramenta de análise da influência da variabilidade da matéria-prima na produtividade da agroindústria do setor cítrico. Simpósio de Engenharia de Produção, 11., 2004, Bauru. **Anais...** Departamento de artes e Representação Gráfica da FAAC,UNESP.

_____. **Projeto de processos de trabalho: o caso da atividade do carteiro**. Rio de Janeiro, 2003. 259 p. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.

_____; CAMAROTTO, J. A ; COSTA, M.A.B. da ; MATUSITA, S.M. ; TORRES, I. Efeitos da Variabilidade da Matéria Prima sobre a Carga de Trabalho: Contribuições da Ergonomia para o Planejamento da Produção. In: Congresso brasileiro de Ergonomia, 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: ABERGO. CD-ROM.

_____; COSTA, M.A.B. da; CAMAROTTO, J.A.; A abordagem utilizada pelo grupo SimuCAD: Simulação e CAD no desenvolvimento de instalações industriais. In: ENEGEP, 1997. **Anais...** Porto Alegre: ABEPRO, 1997. CD-ROM.

MINDGRAPH. **Graphic language to solve problems**. Disponível em: http://www.mind-graph.net. Último acesso em 12/dez/2006.

MONTREUIL, B. Integrating design of cell layout, Input/Output configuration, and flow network of manufacturing systems. apud CHHAJED, D.; MONTREUIL, B; LOWE, T.J. Flow network design for manufacturing systems layout. **European Journal of Operational Research** .Amsterdan: North Holland, 57 p. 145-161, 1992.

_____. RATLIFF, H.D. Optimizing the location of input/output stations within facilities layout; Engineering Costs and Production Economics 14, p. 177-18, 1988. Apud: CHHAJED, D.; MONTREUIL, B; LOWE, T.J. Flow network design for manufacturing systems layout. **European Journal of Operational Research**. Amsterdan: North-Holland. N. 57, p. 145-161, 1992.

_____; RATLIFF, H.D. GOETSCHALCKX; M.; Matching based interactive facility layout. **AIIE Transactions**, 19/3, 1987, 271-279, 1987.

MOORE, J.M.; Computer-aided facilities design: an international survey. **International Journal of Production Research**, Vol. 12, No. 1, 1974, pp. 21-40.

_____. Computer program evaluates plant layout alternatives. **Journal of Industrial Engineering**, v. 3, n. 8, 1971, pp. 19-25.

_____. **Plant layout and design**. New York: The McMillan Company, 1962, 566 p.

MOUSSEAU, V. **Élicitacion des préférences pour l'aide multicritère à la decisión: Mémoire presenté en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches**. Paris, França: Université Paris Dauphine – U.F.R. Sciences des Organisations. 2003.

MUTHER, R. **Planejamento do arranjo físico: sistema SLP**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1978.

_____. **Systematic Layout planning**. 2 ed. Boston: Cahners Books, 1976

NADLER, G. What systems really are. **Modern Materials Handling**, v. 2, n. 7, pp.41-47, Jul. 1965.

NAYAR, N. Workplace Analysis and Ergonomics. **Assembly Automation**. MCB University Press. v. 16, n. 1, 1996, pp. 25–28.

NETTO, A.V; MACHADO, L.S.; OLIVEIRA, M.C.F. Realidade Virtual: Definições, Dispositivos e Aplicações. Tutorial. **Revista Eletrônica de Iniciação Científica da SBC**. mar. 2002. v.2, n.2.

NORMA REGULAMENTADORA 17. **Segurança e Medicina do trabalho**. São Paulo: Editora Atlas, 1996.

OLIVÉRIO, J.L. **Projeto de fábrica: produtos, processos e instalações industriais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Livro Científico Ltda, 1985

OPENCASCADE; **Open CASCADE Technology 6.2 Overview**. Disponível em: http://www.opencascade.com/pub/doc/OCC62_Overview.pdf. Último acesso: 28/fev/2007.

OPENSCENEGRAPH; **Introduction to OpenSceneGraph**. Disponível em: http://www.openscenegraph.com/index.php. Último acesso: 28/fev.2007.

OSMAN, H.M. **CAD-based dynamic layout planning of construction sites using genetic algorithms**. Cairo, 2002. Tese (Mestrado) Faculty of Engineering, Cairo University.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach**. London; Springer-Verlag, 1986, 543 p.

PEMBERTON, A. W. **Arranjo Físico Industrial e Movimentação de materiais**. Rio de Janeiro: Interciência, 1977, 150p.

PERRY, M.; SANDERSON, D. Coordinating joint design work: the role of communication and artifacts. **Design Studies**, v. 19, n. 3, July 1998, pp.273-288.

PIDD, M. **Tools for thinking: modelling in management science**. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.

PORTER, J.M.; FREER, M.;BONNEY, M.C. Computer Aided Ergonomics and Workplace Design. In: WILSON, J.; CORLET, N. (eds) **Evaluation of Human Work: a Practical Ergonomics Methodology**. 2. ed., 1994.

PROMODEL **Promodel User Guide**. Orem, EUA: Promodel Corporation, 2003, 750 p.

PROPLANNER. **Proplanner**. Disponível em: <http://www.proplanner.com>. Último acesso em 12/dez/2006.

PROTH, J-M, 1938-; XIE, X. **Petri nets: a tool for desing and management of manufacturing systems**. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. 288 p.

PUGH, D.S. **Total design: integrated methods for successful product engineering**. Wokinghan: Addison-Wesley Publishers Ltd; 1991, 278 p.

_____; HICKSON, D. J.; HININGS, C.R.; McDONALD, K.M.; TURNER, C.; LUPTON, T.; A Conceptual Scheme for Organizational Analysis. **Administrative Science Quarterly**, 8: 289-315, 1963.

RASMUSSEN, J. A model for the design of computer integrated manufacturing systems: identification of information requirements of decision makers. **Int. J. Ind. Ergon**. 5, p. 5-16, 1990.

REED Jr., R. **Plant layout: factors, principles and techniques**. Homewood: Richard D. Irwin,1961.

RESSLER, S. Open Virtual Reality Testbed Activities. In: Proceedings of UVA-NASA Future Direction of HCI and Its Impact. **Anais...** NASA, 1995

REZENDE, S. (org); **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações.** Barueri, SP: Manole, 2003; 525 p.

RIEG, D.L.; ARAÚJO FILHO, T. Mapas cognitivos como ferramenta de estrututação e resolução de problemas: o caso da pró-reitoria de extensão da UFSCar In: **Gest. Prod.** v.10 n.2 São Carlos, ago. 2003

ROSENBLATT, M.J.; The dynamics of plant layout. **Management Science**, n. 32, 1986, pp. 76-86.

ROSENBLATT, M.J.; GOLANY, B. A distance assigment approach to the facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, n. 57, 1992, p.253-270.

ROTHER, M.; HARRIS, R. **Criando fluxo contínuo: um guia de ação para gerentes, engenheiros e associados da produção**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2002, 103 pp.

_____; SHOOK, J. **Aprendendo a exergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 1998, 103 pp.

SARIN, S.C.; LOHARJUN, P.; MALMBORG, C.; KRISHNAKUMAR, B. A multiattribute decision-theoretic approach for the layout design problem. **European Journal of Operational Research**. Amsterdan: North-Holland. n. 57, 1992, pp. 231-242.

SAHNI, S.; GONZALES, T. P. Complete approximation problems. **Journal of the ACM**, 23(3):555 –565, 1976.

SCHÖN, D.A. Designing: rules, types and worlds; **Design Stud.** 9, 1988, p. 181-190.

SCHRIBER, T. J. **An introduction to simulation using GPSS/H**. New York: John Wiley, 1990. 437 p

SCRIABIN, M; VERGIN, R.C. A Cluster analysis approach to facility layout. **Management Science**, n. 31, 1985, pp. 33-39.

SEEHOF, J.M.; EVANS, W.O. Automated layout design program. **Journal of Industrial Engineering**, v. 18, n. 12, 1967, pp. 690-695.

SEPPONEN, R. **CORELAP 8 User´s manual**. Boston: Department of Industrial Engineering, Northeastern University, 1969.

SHORE, R.H.; TOMPKINS, J.A. Flexible facilities design. **AIIE Transactions**, v. 12, n.2, p. 200-205, Jun., 1980.

SIMUCAD; **SimuCAD**. Disponível em <http://www.simucad.dep.ufscar.br>. Acesso em: 01/mar/2006.

SIPPER, D.; BULFIN, JR.; R.L. **Production: planning, control and integration**. Singapore: Mac-Graw Hill International Editions ,1998.

SIRINAOVAKUL, B.; THAJCHAYAPONG, P. A knowledge base to assist a heuristic search approach to facility layout. **International Journal of Production Research**, n. 32, pp. 141-160, 1994.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. São Paulo: Ed. Atlas S.A., 2a ed., 2002.

SLY, D.P. Object-oriented factory layout in AutoCAD. In: 1998 Winter Simulation Conference, 1998, Washington DC, EUA. **Anais…** New York: ACM, 1998

_____. Issues and Techniques for Using CAD to Draw Factory Layouts. **IIE Solutions**, pp. 14-17, Mar, 1996.

SMARTBOARD. SmartBoard. Disponível em: <http://www.smartboard.com.br/>.último acesso em: 12/dez/2006.

SULE, D.R. **Manufacturing facilities**. Boston, EUA: PWS-Kent Publishing Co., 1992.

TAM, K. Y. A simulated annealing algorithm for allocating space to manufacturing cells. **International Journal of Production Research**, vol. 30, 1991, pp. 63-87.

TAM, K. Y., LI, S. G. A hierarchical approach to the facility layout problem, **International Journal of Production Research**, 1991, Vol. 29, No. 1, p. 165-184.

THOMAS, R. J.; **What machines can't do: politics and technology in the industrial enterprise**. Berkeley: University of California Press; 1994, 314 p.

TOMPKINS, J.A.; WHITE, J.A. **Facilities planning**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

TORRES,I. Factory: qualidade e rapidez em projetos de instalações industriais. **Cadware Technology**. São Paulo: Cadware Publishing & Internet. Ano 2, No. 6, pp. 42-44, 1998.

_____; CAMAROTTO, J. A.; LOPES, M. T. R.; COSTA, M. A. B.; MENEGON, N.L.; Utilización del mapeamiento de flujo de valor como herramienta para cambios em sistemas productivos. Convención de Ingenerías y Arquitectura. Havana, 12., Havana, 2004. **Anais...** 2004.

TRANSOM; Transom Jack. Disponível em <http://www.transom.com>. Ultimo acesso em: 14/out/2001.

UGS. **Tecnomatix.** Disponível em <http://www.ugs.com/products/tecnomatix/>. Último acesso em: 12/dez/2006.

ULGEN, O.M.; GUNAL, A.; SHORE, J. Pitfalls of Simulation Modeling and How to Avoid Them by Using a Robust Simulation Methodology. AutoSimulations´ Symposium, Salt Lake City, 1996. **Anais...** Utah: AutoSimulations, pp.21-31, 1996.

URBAN, T. Computational Performance and Efficiency of Lower-Bound Procedures for the Dynamic Facility Layout Problem. **European Journal of Operational Research** .Amsterdan: North-Holland. n. 57, 1992, pp. 271-279.

USHER, A. P. **Uma história das invenções mecânicas**. Campinas, SP: Papirus, 1993, 560p.

VALLE, C.E. **Implantação de indústrias**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.; 1975, 337 p.

VOLLMAN, T.E.; BUFFA, E.S. The facilities layout problem in perspective. **Management Science**. v.12, n. 10, Jun. 1966, pp. 450-468

WANG, T-Y.; LIN, H-C.; WU, K.-B. An improved simulated annealing for facilities layout problems in cellular manufacturing systems. **Computers Industrial Engineering**, v. 34, n. 2, pp. 309-319, 1998.

WATSON, K.; GIFFIN, J.W.; FOULDS, L.R. Orthogonal layouts using the deltahedron heuristic. **Journal of the Australian Combinatorics Society**. n.. 12, pp. 127-144; 1995.

WEBSTER, D.B.; REED Jr., R. A material handling system selection model. **AIIE Transactions**, v. 3, n.1, pp.31-21, 1971.

WEICK, K.E. **The social psychology of organizing**. Reading, MA, Addison-Wesley, 1979.

WELGAMA, P.S.; GIBSON, P.R.; AL-HAKIM, L.A.R. Facilities layout: a knowledge-based approach for converting a dual-graph into a block layout; **International Journal of Production Economics**, n. 33, pp. 17-30, 1994.

WERNECKE, J. **The Inventor Mentor: Programming Object-Oriented 3D Graphics with Open Inventor™, Release 2**. Reading, EUA: Addison-Wesley Publishing Company, 1994a.

_____. **The Inventor Toolmaker**. Reading, EUA: Addison-Wesley Publishing Company, 1994b.

WILDE, E. Functional planning. **Facilities**. MCB University Press; v. 14, n. 7/8 , Jul/Aug,1996, pp. 35–39

WILHELM, M.R.; WARD, T.L. Solving quadratic assignment problems by simulated annealing. **IIE Transactions**, Mars, 1987, pp. 107-119.

WILSON, R.J. **Introduction to graph theory**. 3 ed. New York: Longman Scientific & Technical, 1985. 166 p.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A mentalidade enxuta nas empresas: elimine o desperdício e crie riqueza**.Rio de Janeiro: Campus, 1998. 428p.

W3. **Extensible Markup Language (XML)**. Disponível em: <http://www.w3.org/XML>. Último acesso em 18/jan/2007.

_____. **HTML 4.01 Specification**. Disponível em: <http://www.w3.org/TR/html401>. Último acesso em: 12/dez/2006.

WEB3D; **Virtual Reality Modeling Language**. Disponível em: <www.web3d.org/x3d/specifications/vrml/>. Último acesso em: 12/dez/2006.

YANG, T.; SU, C-T.; HSU, Y-R Systematic layout planning: a study on semiconductor wafer fabrication facilities; **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 20, No. 11, 2000, pp. 1359-1371

ZILBOVICIUS, M.; **Modelos para a produção, produção de modelos: gênese, lógica e difusão do modelo japonês de organização da produção**. São Paulo: FAPESP/Annablume, 1999.

APÊNDICE A

Fórmulas usadas para cálculo dos fluxos no software FactoryFLOW

Neste apêndice são apresentadas as fórmulas usadas pelo *software* Factory (CIMTECHNOLOGIES, 1995) para cálculo do fluxo de materiais e utilização dos recursos de transformação.

Cálculo da freqüência de transporte

A freqüência de movimentação entre as áreas de atividade **i** e **j** através do sistema **k** de movimentação é dada por:

$$F_{ijk} = \frac{\left(P_x \times Q_{xy}\right)}{U_{xy} \times \left(1 - \frac{TR_{xy}}{100}\right)}$$

onde:

Fijk Freqüência de movimentacao entre as áreas de atividade i e j usando o sistema k
Px Volume de produção do produto x
Qxy Número de partes y por produto x
Uxy Tamanho da unidade de carga da parte y
TRxy Taxa de refugo na produção da parte y

Cálculo dos custos de transporte

Custo de manuseio para transportar material da área de atividade **i** para a **j** usando o sistema de manuseio **k**

$$C_{ijk} = M_{ijk} \times F_{ijk}$$

Para os **equipamentos de manuseio móveis**, o cálculo de $\mathbf{M_{ijk}}$ é dado por

$$M_{ijk} = \left(\frac{T_{ijk}}{TmpoT_k} \times N_k \times C_k \right) + T_{ijk} \times O_k$$

onde:

$\mathbf{T_{ijk}}$	Tempo de movimentação da área de atividade **i** para a **j** usando o sistema **k**
$\mathbf{TmpoT_k}$	Soma dos tempos de transporte usando o sistema **k**
$\mathbf{N_k}$	Numero de unidades do equip. do tipo **k**
$\mathbf{C_k}$	Custo de investimento por peça de equip. **k**
$\mathbf{O_k}$	Custos de combustível, energia, manutenção e mão-de-obra por tipo de equipamento por unidade de tempo no sistema **k**

Por sua vez, $\mathbf{T_{ijk}}$ é calculado da seguinte forma:

$$T_{ijk} = A_k + \frac{1}{V_k} \times \frac{D_{ijk}}{E_k}$$

onde:

Ak	Tempo de carga e descarga por movimentação
Vk	Velocidade média de transporte do equipamento no sistema k
Dijk	Distancia entre as áreas de atividade i e j
Ek	Eficiencia do dispositivo

Para os **equipamentos de manuseio imóveis**, como esteiras, por exemplo, $\mathbf{M_{ijk}}$ é calculado da seguinte maneira:

$$M_{ijk} = \frac{D_{ijk}}{FreqT_k} \times N_k \times T_k$$

onde:

$\mathbf{D_{ijk}}$	Distancia entre as áreas de atividade **i** e **j**
$\mathbf{T_k}$	Custo total por peça de equipamento por unidade de tempo no sistema **k** (investimento, combustível, energia, manutenção e mão-de-obra)
$\mathbf{FreqT_k}$	Soma das vezes transportadas usando o sistema **k**
$\mathbf{N_k}$	Numero de unidades do equipamento do tipo **k**

Cálculo do nível de utilização

Utilização do equipamento de manuseio

$$U_k = \frac{FreqT_k}{\left(Disp_k \times N_k\right)}$$

onde:

$\mathbf{SUMT_k}$	Soma das vezes transportadas usando o sistema k
$\mathbf{Disp_k}$	Tempo disponível por peça de equip./ do sistema k
$\mathbf{N_k}$	Quantidade do tipo de equipamento por sistema

Utilização da área de atividade

$$U_a = \frac{TU_a}{Disp_a \times N_a}$$

onde:

$\mathbf{U_a}$	Utilização da área de atividade
$\mathbf{TU_a}$	Tempo de utilização da área de atividade a
$\mathbf{Disp_a}$	Tempo disponível da área de atividade
$\mathbf{N_a}$	Número de máquinas/servidores na área de atividade

Por sua vez, o tempo de utilização da área de atividade é dado por:

$$TU_a = \sum_{x=1}^{NP} \left(\frac{P_x \times Q_{xy} \times \left(\frac{Setup_{xy}}{Lote_{xy}} + TCic_{xy} \right)}{1 - \frac{TR_{xy}}{100}} \right)$$

onde:

NP	Número de produtos
P_x	Volume de produção do produto x
Q_{xy}	Quantidade de partes y no produto x
$Setup_{xy}$	Tempo de *setup* da parte y do produto x
$Lote_{xy}$	Tamanho do lote de fabricação da parte y do produto x
$TCic_{xy}$	Tempo de ciclo de cada parte y do produto x
TR_{xy}	Taxa de refugo na produção da parte y do produto x

Apêndice B

Amostra de um arquivo XML usado para representar um objeto da biblioteca

```
<Contents>
    <Object Name='Operador' Kind='Operador' X='0' Y='1244920'>
      <Info>
            Modelo representando um operador genérico
      </Info>
      <Attribute Name='Altura' Value='1.8' Description='Metros'/>
      <Shape2D>
          <Polygon X="0" Y="0" BorderColor="13140000" BorderWidth="0"
                   FillColor="16763080" FillPattern="0" FillStyle="0">
              <Point X="-46" Y="-22" />
              <Point X="46" Y="-22" />
              <Point X="52" Y="-16" />
              <Point X="52" Y="16" />
              <Point X="46" Y="22" />
              <Point X="-46" Y="22" />
              <Point X="-52" Y="16" />
              <Point X="-52" Y="-16" />
          </Polygon>
          <Text X='0' Y='0' Align='1' Font='arial' Size='14'
                Bold='1' Italic='1'
                Underline='0' StrikeOut='0' Color='0'>
                Operador
          </Text>
      </Shape2D>
      <Shape3D File='Operador.wrl' />
    </Object>
</Contents>
```

Apêndice C

Arquivo da API OpenInventor que descreve uma molécula de água

```
#Inventor V2.1 ascii
Separator {
  Group {
    Group {
      Material {
        ambientColor 1 0 0
        diffuseColor 1 0 0
        specularColor 0.5 0.5 0.5
        shininess 0.5
      }
      Sphere {
      }
    }
    Group {
      Transform {
        translation 0 -1.2 0
        scaleFactor 0.75 0.75 0.75
      }
      Material {
        ambientColor 1 1 1
        diffuseColor 1 1 1
        specularColor 0.5 0.5 0.5
        shininess 0.5
      }
      Sphere {
      }
    }
    Group {
      Transform {
        translation 1.1852 1.3877 0
      }
      Sphere {
      }
    }
  }
}
```